



ตำราวิชาวิทยุ

พ.ศ. ๒๕๖๗

โดย

กองโรงงาน กรมสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ทหารอากาศ

กองทัพอากาศ

ดอนเมือง

กรุงเทพมหานคร

## คำนำ

ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีในปัจจุบัน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงและพัฒนาระบบสื่อสารเข้าสู่ยุคแห่งข้อมูลข่าวสาร (Information Age) ที่นำเทคโนโลยีด้านการสื่อสารและสารสนเทศ เชื่อมโยงข้อมูลระหว่างหน่วยงานกำลังต่างๆ เข้าด้วยกันในรูปแบบของเครือข่าย (Network) แล้วทำการแลกเปลี่ยนข้อมูลข่าวสารที่จำเป็นในการรบให้เกิดประโยชน์เหนือฝ่ายข้าศึก กองทัพอากาศมุ่งมั่นพัฒนา "SMART RTAF" คือ ทหารฉลาด "SMART PEOPLE" อาวุธฉลาด "SMART WEAPONS SYSTEMS" และกลยุทธ์ฉลาด "SMART TACTICS" โดยกองทัพอากาศจะดำรงขีดความสามารถและความพร้อมในการปฏิบัติการกิจด้วยการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างคุ้มค่าที่สุดเพื่อประเทศชาติและประชาชนอย่างเต็มกำลังความสามารถ

การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานของระบบสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ ให้เป็นมาตรฐานเดียวกันและบูรณาการงานให้สามารถใช้ประโยชน์ร่วมกันได้จากนั้นมุ่งสู่การกองทัพอากาศขับเคลื่อนเปลี่ยนผ่านจาก "กองทัพอากาศชั้นนำในภูมิภาค" ไปสู่การเป็น "SMART RTAF" โดยสามารถใช้เทคโนโลยีดิจิทัล และแนวคิดการปฏิบัติการที่ใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง (NCO) ในการปฏิบัติการรบ และการปฏิบัติการที่มีใช้การรบ เพื่อตอบสนองต่อภัยคุกคามในทุกรูปแบบ ได้อย่างมีประสิทธิภาพบนพื้นฐานของการพึ่งพาตนเองให้มากที่สุดในทุกๆ ด้าน เพื่อให้ระบบสื่อสาร "เชื่อถือได้ รวดเร็ว" ซึ่งเป็นส่วนสำคัญต่อภารกิจทหาร

ระบบวิทยุสื่อสารเป็นอุปกรณ์สื่อสารประเภทหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในกิจการทางทหารทั้งด้านยุทธการและธุรการ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุม กำกับดูแล และบังคับบัญชา ถือเป็นปัจจัยทวีกำลังรบ (Force Multiplier) โดยมีย่านความถี่ครอบคลุม MF/HF/VHF/UHF แต่ละย่านความถี่ต่างก็มีคุณสมบัติในการแพร่กระจายคลื่นที่แตกต่างกัน การติดตั้งอุปกรณ์ การนำไปใช้งานตลอดจนการดูแลบำรุงรักษาที่เหมาะสม ผู้ปฏิบัติงานที่อยู่ในองค์ประกอบของการปฏิบัติงานจำเป็นต้องมีความรู้ ความเข้าใจอย่างแท้จริง จึงจะสามารถสนับสนุนการปฏิบัติการกิจให้บรรลุผลตามที่มุ่งหวังได้

การจัดทำเอกสารเล่มนี้ วัตถุประสงค์เพื่อใช้เป็นตำราในการสอบคัดเลือกนายทหารสัญญาบัตรเหล่าทหารสื่อสาร จำพวกทหารสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์และเป็นการปรับปรุงเนื้อหาวิชาวิทยุให้เหมาะสมตามแผนปรับปรุงตำราเหล่าสื่อสาร ให้สอดคล้องกับเทคโนโลยีระบบสื่อสารของกองทัพอากาศและแนวโน้มการพัฒนาของเทคโนโลยีในอนาคต ทั้งนี้เพื่อให้บุคลากรกรมสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ทหารอากาศ ได้ศึกษาหาความรู้ และพัฒนาตนในการเตรียมความพร้อมเป็นส่วนหนึ่งของการเป็น "SMART RTAF"

คณะผู้จัดทำ

# สารบัญ

	หน้า
คำนำ	ก
สารบัญ	ค
สารบัญตาราง	ง
สารบัญภาพ	จ
บทที่ ๑ บทนำ	๑
๑.๑ ความเป็นมา	๑
๑.๒ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	๑
๑.๓ แอมพลิจูดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	๕
๑.๔ การแพร่กระจายคลื่น	๑๓
บทที่ ๒ ทฤษฎีและหลักการทำงาน	๓๐
๒.๑ ระบบวิทยุ AM	๓๑
๒.๒ ระบบวิทยุ FM	๔๐
๒.๓ ระบบวิทยุ SSB	๔๗
๒.๔ ข้อกำหนดการใช้สัญลักษณ์บ่งชี้คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ	๕๐
บทที่ ๓ ประเภทและการใช้งาน	๕๔
๓.๑ กล่าวนำ	๕๔
๓.๒ ระบบวิทยุควบคุมการบิน	๕๕
๓.๓ ระบบวิทยุซิงเกิลไซด์แบนด์	๖๒
๓.๔ ระบบวิทยุสื่อสารยุทธวิธี	๖๙
๓.๕ ระบบวิทยุข่ายควบคุมและสั่งการ	๗๓
บทที่ ๔ แนวโน้มการพัฒนาของเทคโนโลยีในอนาคต	๘๔
๔.๑ กล่าวนำ	๘๔
๔.๒ ระบบวิทยุ Have Quick	๘๔
๔.๓ Radio Centric Network	๘๘
บรรณานุกรม	ณ

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ ๑-๑ การแบ่งย่านความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และค่าศัพท์เฉพาะ	๕
ตารางที่ ๑-๒ ความถี่และความยาวคลื่นของย่านความถี่ต่ำ ๆ	๘
ตารางที่ ๑-๓ ความสามารถในการแพร่กระจายคลื่นสู่ผิวหน้าของย่านความถี่ต่าง ๆ	๑๐
ตารางที่ ๑-๔ ค่าความนำไฟฟ้าของพื้นผิวชนิดต่าง ๆ	๑๖
ตารางที่ ๑-๕ มุม Tilt กับความถี่และชนิดของพื้นผิว	๑๗

# สารบัญภาพ

หน้า

รูปภาพที่ ๑-๑ การกระจายพลังงานของคลื่น	๒
รูปภาพที่ ๑-๒ การหักเหของคลื่น	๓
รูปภาพที่ ๑-๓ การเดินทางของคลื่นในบรรยากาศ	๓
รูปภาพที่ ๑-๔ การแผ่พลังงานของหน้าคลื่น	๔
รูปภาพที่ ๑-๕ การเลี้ยวอ้อมสันเขาของคลื่น	๔
รูปภาพที่ ๑-๖ คลื่นสะท้อนจากสิ่งกีดขวางขนาดใหญ่	๕
รูปภาพที่ ๑-๗ แสดงภาพการสื่อสารแนวระดับสายตา	๗
รูปภาพที่ ๑-๘ สเปกตรัมของแสงที่มองเห็นได้	๗
รูปภาพที่ ๑-๙ ความยาวคลื่น	๘
รูปภาพที่ ๑-๑๐ แสดงการคำนวณค่าความถี่ให้เป็นค่าความยาวคลื่น	๘
รูปภาพที่ ๑-๑๑ การแพร่กระจายคลื่นของย่านความถี่ ELF VLF LF	๙
รูปภาพที่ ๑-๑๒ ภาพสะท้อนของคลื่นกลับไปกลับมาระหว่างพื้นโลกกับชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์	๑๑
รูปภาพที่ ๑-๑๓ ระยะทางติดต่อสื่อสารขึ้นอยู่กับความยาวของเสาอากาศ	๑๒
รูปภาพที่ ๑-๑๔ การแพร่คลื่นในลักษณะแนวเส้นสายตาของ VHF	๑๒
รูปภาพที่ ๑-๑๕ การแสดงการกลับเฟสของคลื่นที่สะท้อนกับพื้นผิวใด ๆ	๑๔
รูปภาพที่ ๑-๑๖ แสดงการตกกระทบของคลื่นเมื่อไปกระทบกับวัสดุใด ๆ เมื่อสะท้อนกลับมาจะมีส่วนหนึ่งถูกดูดซับ	๑๔
รูปภาพที่ ๑-๑๗ ภาพแสดงคลื่นการโน้มรอบวัตถุหน้าคลื่น	๑๕
รูปภาพที่ ๑-๑๘ ภาพแสดงการเกิดมุม Tilt	๑๗
รูปภาพที่ ๑-๑๙ การสื่อสารด้วยคลื่นที่ส่งมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์	๑๘
รูปภาพที่ ๑-๒๐ ภาพการสื่อสารแบบแนวเส้นสายตา	๑๙
รูปภาพที่ ๑-๒๑ การเดินทางของคลื่นตรงและสะท้อนบนพื้นโลกเรียบ	๒๐
รูปภาพที่ ๑-๒๒ ขบวนการ Photoionization	๒๑
รูปภาพที่ ๑-๒๓ การปรากฏของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในเวลากลางวันและกลางคืน	๒๒
รูปภาพที่ ๑-๒๔ วงรอบ Sunspot Number ของดวงอาทิตย์	๒๓
รูปภาพที่ ๑-๒๕ ภาพแสดงมุม Zenith Angle ( $\chi$ ) ซึ่งมีค่าแตกต่างกันตามฤดูกาล	๒๓
รูปภาพที่ ๑-๒๖ เส้นทางการแพร่คลื่นฟ้าผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และย่านกระโดด	๒๔
รูปภาพที่ ๑-๒๗ ภาพแสดงของเส้นทางวงรอบใหญ่	๒๕
รูปภาพที่ ๑-๒๘ ภาพแสดงโอกาสที่คลื่นวิทยุจะเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศไปได้	๒๖
รูปภาพที่ ๑-๒๙ กรณีนีมูม TOA คงที่ แสดงความสัมพันธ์ระยะทางกับความถี่ใช้งาน	๒๗

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปภาพที่ ๑-๓๐ กรณียะยะทางที่ต้องการติดต่อกึ่งที่	๒๗
รูปภาพที่ ๑-๓๑ กรณียะยะทางที่ จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับมุมส่งออก	๒๘
รูปภาพที่ ๒-๑ องค์ประกอบการสื่อสารวิทยุอย่างง่าย	๓๐
รูปภาพที่ ๒-๒ เครื่องส่งแบบ CW	๓๒
รูปภาพที่ ๒-๓ ภาพแสดงส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องส่งแบบ AM	๓๒
รูปภาพที่ ๒-๔ ภาพแสดงการมอดูเลตคลื่นต้นแบบให้เป็นคลื่น AM	๓๓
รูปภาพที่ ๒-๕ ภาพแสดงเส้นความถี่ของคลื่นต้นแบบและคลื่นแบบ AM	๓๔
รูปภาพที่ ๒-๖ ภาพแสดงการมอดูเลชันแบบ AM ซึ่งยังคงรูปร่างของ Envelope เดิม ของสัญญาณต้นแบบหลังการมอดูเลชันแล้ว	๓๔
รูปภาพที่ ๒-๗ แสดงเอาต์พุตของเครื่องส่งระบบ AM	๓๔
รูปภาพที่ ๒-๘ ภาพแสดงการมอดูเลชันที่ ๑๐๐% ซึ่งทำให้ USB และ LSB ออกอากาศ ด้วยพลังงานสูงสุด คือครึ่งหนึ่งของคลื่นพาห้	๓๕
รูปภาพที่ ๒-๙ แผนภาพการทำงานของเครื่องรับซูเปอร์เฮเทอโรไดน์	๓๗
รูปภาพที่ ๒-๑๐ ตัวอย่างการสร้างความถี่ IF ของภาคมิกเซอร์ในเครื่องซูเปอร์เฮเทอโรไดน์	๓๘
รูปภาพที่ ๒-๑๑ แผนภาพการทำงานของวงจร AFC	๔๐
รูปภาพที่ ๒-๑๒ การผลิตคลื่นความถี่ FM อย่างง่าย	๔๐
รูปภาพที่ ๒-๑๓ แบริ้นวิตของคลื่น FM	๔๒
รูปภาพที่ ๒-๑๔ Block Diagram ของภาครับวิทยุแบบ FM	๔๔
รูปภาพที่ ๒-๑๕ แสดงระดับสัญญาณที่ได้รับได้มีความเข้มมากกว่า Noise Threshold	๔๕
รูปภาพที่ ๒-๑๖ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Noise Threshold ( $T_n$ ) กับ Fade Margin Threshold	๔๗
รูปภาพที่ ๒-๑๗ บล็อกไดอะแกรมเครื่องส่ง SSB	๔๙
รูปภาพที่ ๒-๑๘ บล็อกไดอะแกรมเครื่องรับ SSB	๕๐
รูปภาพที่ ๓-๑ การแบ่งส่วนของภูมิภาคในการกำหนดตารางคลื่นความถี่ของ ITU	๕๔
รูปภาพที่ ๓-๒ แสดงเครื่องรับ-ส่ง ควบคุมการบินแบบ Single Channel ที่ใช้งานใน ทอ	๕๗
รูปภาพที่ ๓-๓ วิทยุควบคุมการบินแบบ Multi Channel	๕๘
รูปภาพที่ ๓-๔ วิทยุควบคุมการบินแบบ Multi Channel-Multi Band-Multi Mode	๕๙
รูปภาพที่ ๓-๕ แสดงระยะทางการติดต่อแบบ OHD และ RHD	๖๑
รูปภาพที่ ๓-๖ เครื่องวิทยุซิงเกิลไซด์แบริ้นที่มีใช้ในกองทัพอากาศ	๖๓

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปภาพที่ ๓-๗ การเปรียบเทียบกำลังส่ง SSB กับ AM	๖๓
รูปภาพที่ ๓-๘ Horizontal Half Wave Dipole Antenna	๖๖
รูปภาพที่ ๓-๙ Slant Doublet Half Wave Dipole Antenna	๖๖
รูปภาพที่ ๓-๑๐ Inverted Vee Doublet Half Wave Dipole Antenna	๖๗
รูปภาพที่ ๓-๑๑ Long Wire Antenna	๖๗
รูปภาพที่ ๓-๑๒ Broadband Dipole Antenna	๖๘
รูปภาพที่ ๓-๑๓ Vertian Whip Antenna	๖๘
รูปภาพที่ ๓-๑๔ เครื่องวิทยุที่ใช้งานย่านความถี่ HF	๗๐
รูปภาพที่ ๓-๑๕ เครื่องวิทยุที่ใช้งานย่านความถี่ VHF	๗๑
รูปภาพที่ ๓-๑๖ เครื่องวิทยุที่ใช้งานย่านความถี่ UHF	๗๑
รูปภาพที่ ๓-๑๗ การติดต่อสื่อสารในระบบสื่อสารยุทธวิธี	๗๒
รูปภาพที่ ๓-๑๘ สัญญาณ Analog และ สัญญาณ Digital	๗๘
รูปภาพที่ ๓-๑๙ วิทยุชนิดมือถือ (Hand-Held)	๗๙
รูปภาพที่ ๓-๒๐ วิทยุชนิดติดรถยนต์ (Mobile Radio หรือ Vehicle Radio)	๘๐
รูปภาพที่ ๓-๒๑ วิทยุชนิดประจำที่ VHF/FM (Base Station)	๘๑
รูปภาพที่ ๓-๒๒ วิทยุชนิดทวนสัญญาณ (Repeater)	๘๒
รูปภาพที่ ๓-๒๓ สัญญาณ Analog และ สัญญาณ Digital	๘๓
รูปภาพที่ ๔-๑ การปฏิบัติการใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง	๘๙
รูปภาพที่ ๔-๒ การนำข้อมูลข่าวสารจากเครือข่ายอื่นๆ	๙๐

# บทที่ ๑

## บทนำ

### ๑.๑ ความเป็นมา

การค้นพบระบบสื่อสาร (Communication Systems) มีมาก่อนศตวรรษที่ ๒๐ เริ่มจากการค้นพบกระแสไฟฟ้า แม่เหล็ก และปรากฏการณ์ไฟฟ้าสถิต นับจาก Samuel Morse ประดิษฐ์เครื่องโทรเลขในปี ค.ศ.๑๘๓๗ จุดประกายให้เกิดความก้าวหน้าในการพัฒนาระบบสื่อสาร ซึ่งต่อมา Alexander Graham Bell ได้ประดิษฐ์โทรศัพท์ขึ้นใช้งานเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ.๑๘๗๖ จากนั้นระบบสื่อสารแบบไร้สายที่สมบูรณ์ก็ได้ถูกมนุษย์สร้างขึ้นมาใช้งานเป็นครั้งแรกของโลกโดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ Guglielmo Marconi ในปี ค.ศ.๑๘๙๔ และ Lee DeForest ประดิษฐ์หลอดสุญญากาศ Triode ในปี ค.ศ.๑๙๐๘ ซึ่งเป็นการเริ่มเข้าสู่ยุคแห่งการสร้างวงจรภาคขยายทางอิเล็กทรอนิกส์อันเป็นประตูแห่งการก้าวสู่ยุคแห่งการสื่อสารแบบไร้สาย จนกระทั่งปี ค.ศ.๑๙๔๘ การค้นพบครั้งสำคัญในประวัติศาสตร์ของยุคแห่งอิเล็กทรอนิกส์ก็ได้เกิดขึ้นอีกครั้งเมื่อ Shockley, Brattain และ Bardeen ได้สร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เรียกว่า “ทรานซิสเตอร์ (Transistor)” และนั่นคือการพัฒนาให้เกิดอุปกรณ์ IC, Chip และคอมพิวเตอร์ที่เราคุ้นเคยในปัจจุบัน

### ๑.๒ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave)

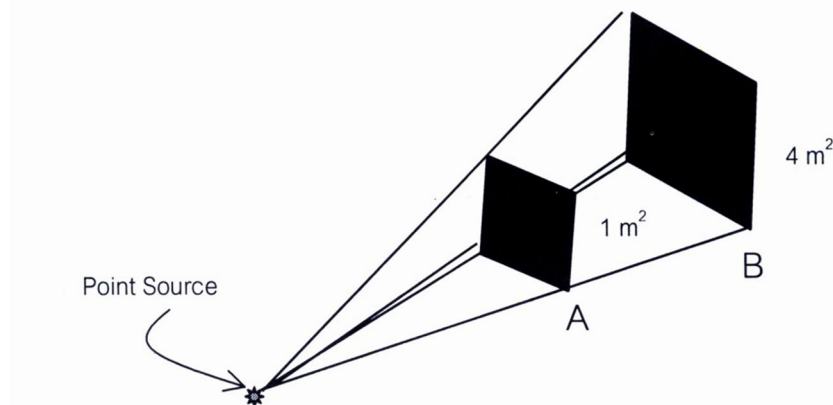
#### ๑.๒.๑ ความเข้มของสนามไฟฟ้า

ความแรงของพลังงานคลื่นวิทยุสามารถวัดได้จากค่าระดับความเข้มสนามไฟฟ้า (Electric Field Intensity) เกิดจากคลื่นวิทยุที่แพร่กระจายอยู่ในตัวกลางชนิดต่าง ๆ โดยมีหน่วยมาตรฐานที่ใช้วัดคือ โวลต์/เมตร (V/m) แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ค่าของสนามไฟฟ้ามักจะมีค่าน้อยมาก จึงนิยมใช้ให้อยู่ในหน่วยมิลลิโวลต์/เมตร (mV/m) หรือ ไมโครโวลต์/เมตร ( $\mu\text{V/m}$ )

สมมติว่า คลื่นมีแหล่งกำเนิดการกระจายออกมาจากสายอากาศที่มีลักษณะเป็นจุด (Point Source) ตามทฤษฎีแล้วก็จะกระจายออกไปรอบ ๆ สายอากาศที่มีลักษณะเป็นจุดนั้นอย่างสม่ำเสมอ คล้ายแสงไฟที่กระจายออกไปจากหลอดไฟกลม ๆ พลังงานของคลื่นนั้นจะไม่มีสูญหายไป หากมันไม่ได้ไปกระทบกับวัตถุหรือสิ่งกีดขวางที่จะดูดซับพลังงานไปจากมัน สายอากาศนั้นจะกระจายระลอกคลื่นให้ดาหน้าออกไปเป็น “หน้าคลื่น” (Wave Front) ในลักษณะของทรงกลมที่ค่อย ๆ ใหญ่ขึ้น ๆ ดังนั้นหน้าคลื่นที่อยู่ใกล้กับสายอากาศก็ย่อมจะมีความเข้มมากกว่าหน้าคลื่นที่อยู่ห่างไกลออกไป ทั้งนี้เพราะว่า พื้นที่ของผิวทรงกลมจะขยายออกมากขึ้น

เมื่อทรงกลมมีขนาดใหญ่ขึ้น จึงทำให้พลังงานของคลื่นตลอดผิวหน้าของทรงกลมมีค่าเฉลี่ยต่อพื้นที่น้อยลง ดังรูปภาพที่ ๑ - ๑ ช่วยทำให้เราเข้าใจถึงว่า ทำไมความเข้มของพลังงานหรือพลังงานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่จึงมีค่าลดลง เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ห่างออกไปจากจุดกำเนิดคลื่นมากยิ่งขึ้น





### รูปภาพที่ ๑ - ๑ การกระจายพลังงานของคลื่น

ค่าของความหนาแน่นหรือความเข้มของกำลังงานในคลื่นที่เคลื่อนที่ออกไปเป็นระยะต่าง ๆ จากจุดกำเนิด จะมีค่าแปรผกผันกับระยะทางยกกำลังสอง นั่นคือ เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น ค่าความเข้มของคลื่นที่จุดต่าง ๆ จะมีค่าลดจากค่าพลังงานเริ่มต้นจากสายอากาศ (P) และสามารถคำนวณได้จากสมการด้านล่าง ค่าที่คำนวณได้เป็น dB หรือ Watt ต่อ ฟุต<sup>2</sup> หรือ เมตร<sup>2</sup> ดังนี้

$$\text{ความหนาแน่นของกำลังงาน} = \frac{P}{(4\pi d^2)}$$

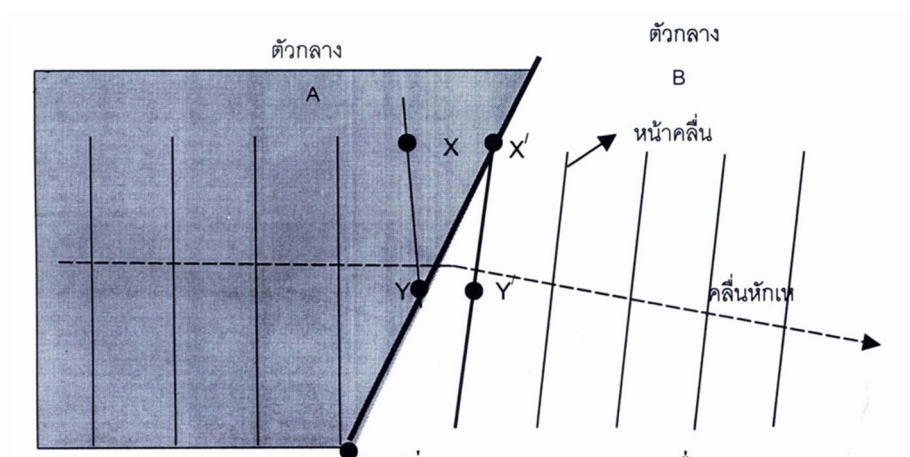
P คือ กำลังของคลื่นจากสายอากาศ หรือ แหล่งกำเนิดคลื่น

d คือ ระยะทางจากจุดกำเนิดคลื่นมายังบริเวณที่ทำการวัดความแรงของคลื่นนั้น

แม้ว่าคลื่นจะกระจายออกไปจากสายอากาศในลักษณะของทรงกลม แต่เมื่อระยะทางที่คลื่นกระจายออกไปนั้น อยู่ห่างจากสายอากาศมาก ๆ แล้ว หน้าคลื่นก็จะเหมือนกับเกิดอยู่บนพื้นผิวทรงกลมขนาดใหญ่ ดังนั้น ถ้าหากเราพิจารณาเฉพาะเพียงบริเวณส่วนน้อยของหน้าคลื่น เราก็คงจะเห็นว่า หน้าคลื่นมีลักษณะเป็นผิวระนาบราบเรียบเสมอกัน เหมือนกับที่เราคิดว่าพื้นโลกเฉพาะบริเวณใดบริเวณหนึ่งนั้นเป็นที่ซึ่งมีลักษณะแบนราบเป็นระนาบในแนวนอน ซึ่งการพิจารณาคลื่นที่อยู่ไกลจากสายอากาศมาก ๆ ในลักษณะดังกล่าว ทำให้เรามักจะสมมุติว่าคลื่นนั้นคือ “คลื่นระนาบ” (Plane Wave) เป็นคลื่นที่มีลักษณะราบเรียบเสมอกัน และเคลื่อนที่ออกไปเป็นระลอกคลื่นที่เป็นระนาบขนานกัน มากกว่าที่คิดว่าหน้าคลื่นนั้นเคลื่อนที่ออกไปในลักษณะโค้งงอ

### ๑.๒.๒ การหักเหของคลื่น

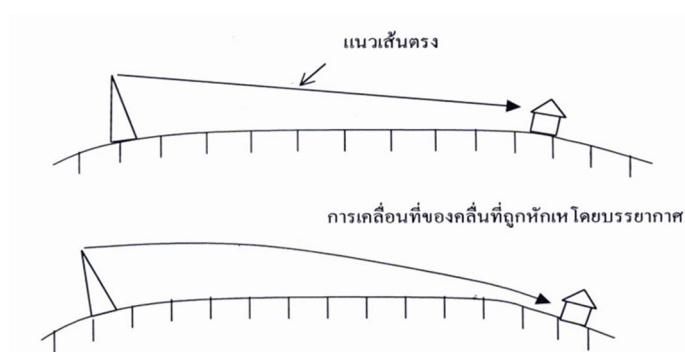
เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกัน ความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางต่าง ๆ เหล่านั้นจะมีค่าไม่เท่ากัน ฉะนั้นเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่จากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่งที่มีความหนาแน่นต่างกันแล้ว เส้นทางการเคลื่อนที่ก็จะเกิดการหักเห (Refraction) ขึ้นที่บริเวณรอยต่อระหว่างตัวกลางทั้งสองนั้น ดังรูปภาพที่ ๑ - ๒



รูปภาพที่ ๑ - ๒ แสดงการหักเหของคลื่น

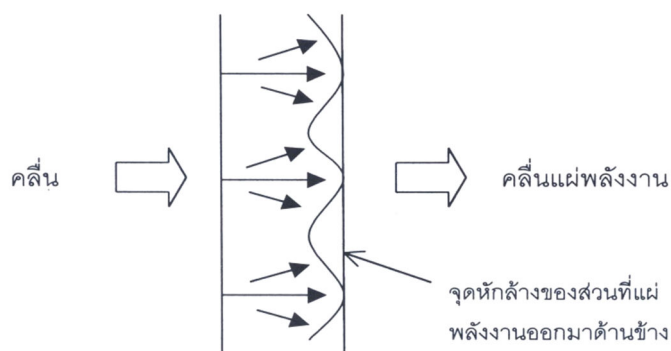
พิจารณารูปภาพที่ ๑.๒ จะทำให้เราเข้าใจสาเหตุแห่งการหักเหแนวทางการเดินทางของคลื่นได้ดียิ่งขึ้น คลื่นเดินทางจากตัวกลาง A ไปยังตัวกลาง B ที่มีความหนาแน่นมากกว่าตัวกลาง A หน้าคลื่นบริเวณจุด Y จะผ่านเข้าไปในตัวกลาง B ก่อนหน้าคลื่นบริเวณจุด X เพราะตัวกลาง B มีความหนาแน่นกว่าตัวกลาง A ดังนั้น คลื่นจะเคลื่อนที่จากจุด Y ไปสู่จุด Y' ได้ระยะทางน้อยกว่าส่วนของคลื่นที่เคลื่อนที่อยู่ในตัวกลาง A คือจากจุด X ไปยังสู่จุด X' ดังนั้น จึงทำให้การเบี่ยงเบนของหน้าคลื่นเกิดขึ้น ทำให้ทิศทางการเดินทางของคลื่นนั้นเกิดการเบี่ยงเบนออกไปจากเดิม

การหักเหของคลื่นจะเกิดขึ้นได้แม้แต่ในบรรยากาศทั่วไป ทั้งนี้เพราะบรรยากาศที่อยู่ในระดับผิวโลกจะมีความหนาแน่นมากกว่าความหนาแน่นของบรรยากาศที่อยู่สูงขึ้นไป จึงทำให้เส้นทางการเคลื่อนที่ของคลื่นมีลักษณะโค้งตามส่วนโค้งของโลก แทนที่จะมีเส้นทางการเดินทางเป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปภาพที่ ๑-๓



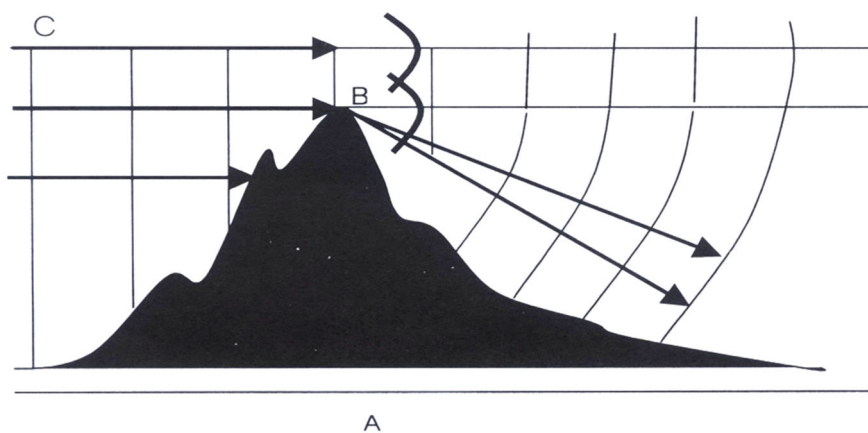
รูปภาพที่ ๑ - ๓ การเดินทางของคลื่นในบรรยากาศ

ปรากฏการณ์ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคือปรากฏการณ์ที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ในมุมรอบวัตถุ (Diffraction) หรือสิ่งกีดขวางไปได้ ที่เป็นดังนี้ เพราะว่าตามทฤษฎีของ Huygens กล่าวว่า “จะมีพลังงานแผ่ (Radiate) ออกไปจากทุก ๆ จุดบนหน้าคลื่น” การแผ่รังสีของหน้าคลื่นที่เคลื่อนที่ไปโดยไม่มีสิ่งกีดขวาง ทำให้เกิดการกระจายของคลื่นออกไปแต่เพียงด้านหน้าเท่านั้น ดังแสดงในรูปภาพที่ ๑ - ๔



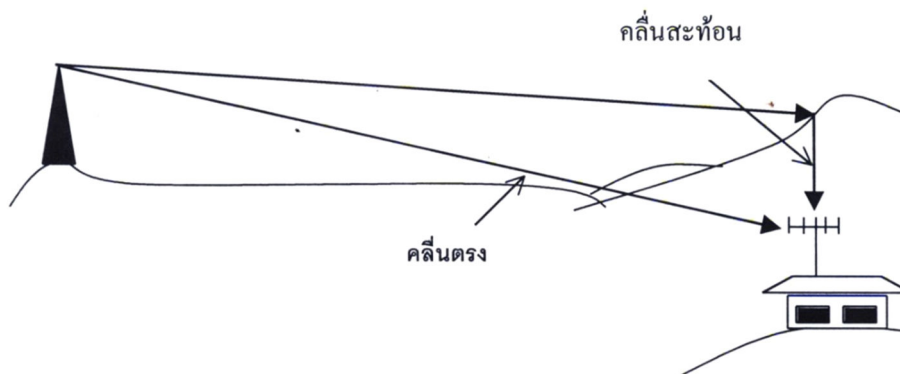
รูปภาพที่ ๑ - ๔ การแผ่พลังงานของหน้าคณีน

เมื่อคณีนเดินทางไปพบกับสิ่งกีดขวาง เช่น ภูเขา ดังรูปภาพที่ ๑-๔ นั้น การแผ่รังสีของพลังงานจากหน้าคณีนที่จุด C จะถูกลดทอนลงโดยภูเขา ทำให้ส่วนของพลังงานที่แผ่รังสีออกจากจุด B ไปในด้านล่างนั้น ไม่ถูกหักล้าง โดยส่วนของพลังงานจากจุด C ซึ่งต่างกับส่วนของพลังงานจากจุด B ที่แผ่รังสีขึ้นไปทางด้านบนและถูกหักล้างไปโดยส่วนที่แผ่รังสีออกจากจุด A ปรากฏการณ์เช่นนี้ทำให้เกิดการกระจายของพลังงานจากจุด B เลี้ยวลงไปเบื้องล่าง ซึ่งลักษณะของปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ เหมือนกับว่าคณีนสามารถเคลื่อนที่ไนมรอบวัตถุสิ่งกีดขวางไปได้นั่นเอง ปรากฏการณ์ของการเคลื่อนที่ไนมรอบสิ่งกีดขวางของคณีนนี้ช่วยให้เราสามารถทำการสื่อสารได้ แม้แต่ในบริเวณที่ถูกบดบังโดยตึกใหญ่ ๆ หรือหลังภูเขา อย่างไรก็ตามในกรณีเช่นนี้ สัญญาณที่ใช้ส่งออกไปนั้นจะต้องเพิ่มความแรงให้สูงกว่าปกติ



รูปภาพที่ ๑ - ๕ การเลี้ยวอ้อมสันเขาของคณีน

ปรากฏการณ์เกี่ยวกับการเดินทางของคณีนแม่เหล็กไฟฟ้าอีกอย่างหนึ่ง คือ เมื่อคณีนเดินทางไปกระทบวัตถุที่มีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับความยาวคณีนจะเกิดการสะท้อนของคณีน (Reflection) คล้ายกับแสงที่สะท้อนจากกระจกเงา การสะท้อนของคณีนนี้เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดเป็นสัญญาณรบกวนอันเนื่องมาจากคณีนตรง และคณีนสะท้อน ใช้เวลาเดินทางต่างกัน ดังเช่น การเกิดภาพซ้อน (Ghosting) ในเครื่องรับโทรทัศน์ เป็นต้น ดังรูปภาพที่ ๑ - ๖



รูปภาพที่ ๑ - ๒ คลื่นสะท้อนจากสิ่งกีดขวางขนาดใหญ่

### ๑.๓ แล็บคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

#### ๑.๓.๑ การแบ่งย่านความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

โดยทั่วไปแล้วตัวกลางที่ใช้ส่งถ่ายพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีปฏิกิริยาต่อความถี่ต่าง ๆ ไม่เหมือนกัน ทำให้คุณสมบัติการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในย่านความถี่ที่ต่างกันมีความแตกต่างกันออกไป เช่น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่แสงจะเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศไปในลักษณะเป็นเส้นตรง ส่วนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่เสียงสามารถเดินทางอ้อมผ่านสิ่งกีดขวางบางอย่างไปได้ เป็นต้น ฉะนั้นจึงได้มีการแบ่งย่านความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อที่จะได้รวบรวมเอาคลื่นความถี่ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกันเข้าไว้ด้วยกัน การแบ่งย่านความถี่และการกำหนดชื่อย่านความถี่ต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ ๑-๑ เป็นไปตามมาตรฐานข้อตกลงระหว่างประเทศ ซึ่งกำหนดโดย ITU (International Telecommunication Union)

ตารางที่ ๑ - ๑ การแบ่งย่านความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และคำศัพท์เฉพาะ

ย่านความถี่	ชื่อความถี่	อักษรย่อ	ชื่อย่านความถี่ในระบบเมตริก
30-300 Hz	Extremely-low frequency	ELF	Megametric Wave
300-3,000 Hz	Voice frequency	VF	-
3-30 kHz	Very-low frequency	VLF	Myriametric Wave
30-300 kHz	Low frequency	LF	Kilometric Wave
300-3,000 kHz	Medium frequency	MF	Hectrometric Wave
3-30 MHz	High frequency	HF	Metric Wave
30-300 MHz	Very-high frequency	VHF	Decimetric Wave
300-3,000 MHz	Ultra-high frequency	UHF	Centimetric Wave
3-30 GHz	Super-high frequency	SHF	Millimetric Wave
30-300 GHz	Extra-high frequency	EHF	Decimillimetric Wave
300-3,000 GHz	-	-	-

คุณสมบัติและประโยชน์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่ต่าง ๆ พอจะสรุปได้ดังนี้

ELF ได้แก่ ย่านความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ต่ำมาก เป็นย่านความถี่ที่อาจเกิดขึ้นจากเครื่องดนตรีและเสียงของสัตว์หรือเสียงของมนุษย์บางส่วน

VF ได้แก่ ย่านความถี่ของคลื่นความถี่ของเสียงมนุษย์ปกติ

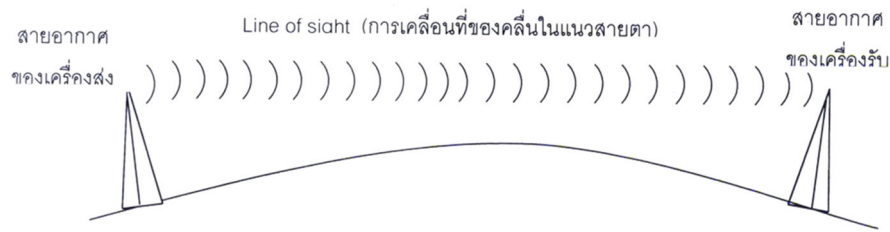
VLF และ LF ได้แก่ ย่านความถี่ที่ใช้สำหรับการสื่อสาร เริ่มแรกใช้สำหรับวิทยุโทรเลข (radio telegraph) แต่เนื่องจากความยาวคลื่นของสัญญาณในย่านนี้มีความยาวมากเป็นกิโลเมตร (ตัวอย่างเช่น  $f = 30 \text{ kHz}$ ,  $\lambda = V/f$  ดังนั้น  $\lambda = 10 \text{ km}$ ) ดังนั้นสายอากาศที่ใช้ในการแพร่กระจายคลื่นย่านความถี่นี้จึงต้องมีความยาวมาก ในทางปฏิบัติทำได้ยาก

MF ได้แก่ ย่านความถี่ของคลื่นที่ใช้ในการส่งกระจายเสียง AM แต่มีคลื่นวิทยุย่าน MF บางส่วนของปลายย่านความถี่ อาจมีการหักเหของคลื่นจากบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ได้

HF ได้แก่ ย่านความถี่ของคลื่นที่ใช้สำหรับการสื่อสาร ซึ่งในบางครั้งการกระจายเสียงวิทยุ AM เรียกว่า “คลื่นสั้น” ในระบบคลื่นสั้นและวิทยุสมัครเล่น คุณสมบัติที่สำคัญสำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่นี้ คือ เมื่อคลื่นนี้เดินทางไปถึงบรรยากาศชั้นสูงสุดที่ห่อหุ้มโลกนี้อยู่ คือ ชั้นไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere) พลังงานของคลื่นบางส่วนจะถูกหักเหหรือสะท้อนโดยชั้นบรรยากาศกลับมายังพื้นโลก ทำให้เกิดการสะท้อนไปมาระหว่างพื้นโลกกับบรรยากาศอันเป็นเหตุทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านนี้สามารถเดินทางไปได้ไกลมาก ดังนั้น คุณภาพของการติดต่อสื่อสารในย่านความถี่นี้จึงขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา

VHF และ UHF ได้แก่ ย่านความถี่ที่มีการเดินทางในตัวกลางในลักษณะคลื่นตรงมากกว่าการสะท้อนจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งเกิดน้อยกว่าเมื่อความถี่สูงขึ้นคลื่นในย่านนี้จึงมีความสามารถที่จะเดินทางทะลุผ่านบรรยากาศชั้นต่าง ๆ ไปได้ เนื่องจากคลื่นในย่านความถี่นี้มีความถี่สูงมาก จึงมักเรียกการสื่อสารในย่านนี้ว่า “การสื่อสารในแนวสายตา” (Line-of-Sight Communication) ดังแสดงในรูปภาพที่ ๑-๗

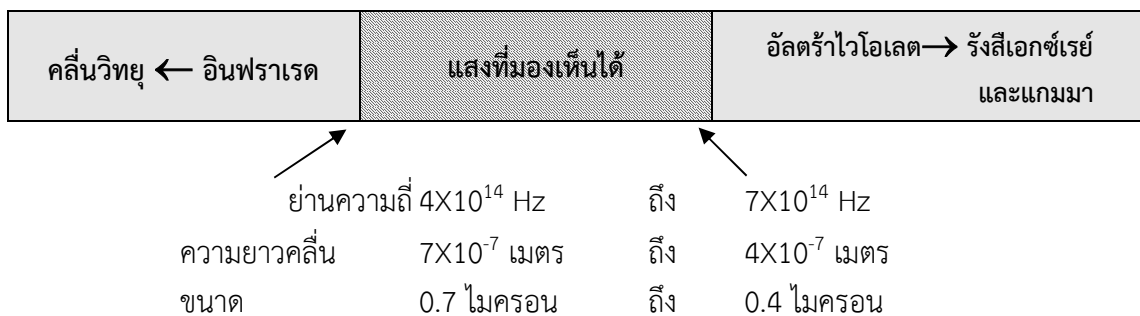
สำหรับย่านความถี่ที่มีความถี่สูงกว่า 1 GHz เรียกว่า “ไมโครเวฟ” (Microwave) ปกติจะใช้ในระบบเรดาร์ (Radar) และการสื่อสารด้านอื่นที่ต้องการแบนด์วิดท์กว้างมาก ไมโครเวฟมีความถี่อยู่ระหว่าง 3 GHz ถึง 30 GHz ความยาวคลื่นของมันคือ ๑๐-๑ ซม. และไมโครเวฟที่มีความถี่สูงกว่า 30 GHz แต่ไม่เกิน 300 GHz ความยาวคลื่นจะมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร ดังนั้น บางครั้งเรียกคลื่นที่มีความถี่อยู่ในย่านไมโครเวฟว่าเป็นคลื่นมิลลิเมตร (Millimeter wave) ข้อดีของการสื่อสารในย่านนี้คือ สายอากาศที่ใช้จะมีขนาดเล็ก แต่มีข้อเสียคือสภาพภูมิอากาศจะมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของคลื่นในย่านความถี่นี้มาก โดยเฉพาะฝน เพราะฝนมีขนาดพอที่จะดูดซับเอาพลังงานของคลื่นสัญญาณไว้ จึงอาจทำให้คลื่นเดินทางไม่ไปถึงเครื่องรับได้



รูปภาพที่ ๑ - ๗ แสดงภาพของระบบการสื่อสารในแนวสายตา หรือ Line-of-Sight

### ๑.๓.๒ สเปกตรัมและความยาวคลื่น

การวิเคราะห์สัญญาณโดยทั่วไปนั้น อาศัยเทคนิคของการแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) จึงทำให้เราทราบว่าสัญญาณต่าง ๆ นั้นประกอบขึ้นจากคลื่นรูปไซน์ (Sine Wave) และสัญญาณฮาร์มอนิก (Harmonics) จำนวนมาก โดยที่แถบพลังงานที่ครอบคลุมคลื่นรูปไซน์ทั้งหมดที่ประกอบขึ้นเป็นสัญญาณนั้น เรียกว่า สเปกตรัม (Spectrum) ของสัญญาณนั้น สัญญาณที่กล่าวถึงในที่นี้เราหมายถึงสัญญาณโดยทั่วไป ซึ่งอาจจะเป็นสัญญาณเสียง สัญญาณไฟฟ้าหรือสัญญาณกายภาพอื่น ๆ ก็ได้ รูปภาพที่ ๑-๘ แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมที่มนุษย์มองเห็นได้ ปริมาณที่สำคัญอย่างหนึ่งซึ่งช่วยให้เราแบ่งแยกคุณสมบัติบางประการของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้คือ “ความยาวคลื่น” (wavelength)

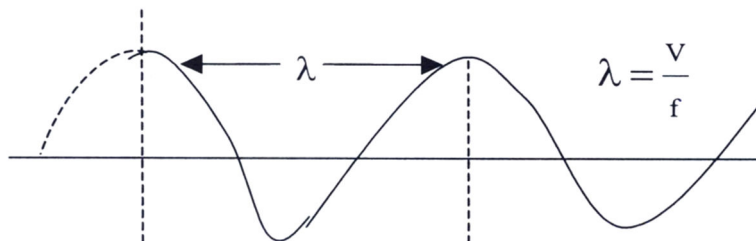


รูปภาพที่ ๑-๘ สเปกตรัมของแสงที่มองเห็นได้

ความยาวคลื่น คือ ระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ไปครบหนึ่งลูกคลื่น เป็นความยาวที่วัดได้จากระยะทางระหว่างยอดคลื่นที่เกิดตามกันมา (ดูรูปภาพที่ ๑-๙) ถ้าเราให้  $V$  คือความเร็วของคลื่นสัญญาณที่เดินทางผ่านตัวกลางซึ่งมีหน่วยเป็น เมตร/วินาที และถ้าคลื่นนั้นเกิดขึ้นด้วยความถี่  $f$  Hz เราก็สามารถที่จะคำนวณหาความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) มีหน่วยเป็นเมตรได้ดังนี้คือ

$$\text{ความยาวคลื่น } (\lambda) = V/f$$

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อเดินทางผ่านสุญญากาศ จะมีความเร็วเท่ากับความเร็วแสง คือ  $3 \times 10^8$  เมตร/วินาที ในขณะที่เมื่อผ่านตัวกลางชนิดอื่นที่มีความหนาแน่นมากกว่าจะทำให้ความเร็วของคลื่นลดลง เช่น ตัวกลางที่เป็นทองแดงจะมีความเร็วของคลื่นเท่ากับ  $2.8 \times 10^8$  เมตร/วินาที เป็นต้น



รูปภาพที่ ๑ - ๙ ความยาวคลื่น

ตารางในรูปภาพที่ ๑-๑๐ ใช้ช่วยในการหาค่าของความยาวคลื่น (เมตร) จากความถี่ของคลื่นแม่เหล็ก-ไฟฟ้า

ความถี่ในช่วงตั้งแต่ (MHz)	คุณค่าความถี่ด้วย	คุณค่าความยาวคลื่นด้วย
๐.๐๓ - ๐.๓	๐.๐๑	๑๐๐
๐.๓ - ๓.๐	๐.๑	๑๐
๓.๐ - ๓๐	๑	๑
๓๐ - ๓๐๐	๑๐	๐.๑
๓๐๐ - ๓,๐๐๐	๑๐๐	๐.๐๑
๓,๐๐๐ - ๓๐,๐๐๐	๑,๐๐๐	๐.๐๐๑
๓๐,๐๐๐ - ๓๐๐,๐๐๐	๑๐,๐๐๐	๐.๐๐๐๑

รูปภาพที่ ๑ - ๑๐ แสดงการคำนวณค่าความถี่ให้เป็นค่าความยาวคลื่น

### ๑.๓.๓ การใช้งานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

#### ๑.๓.๓.๑ ย่านความถี่ ELF, VLF และ LF

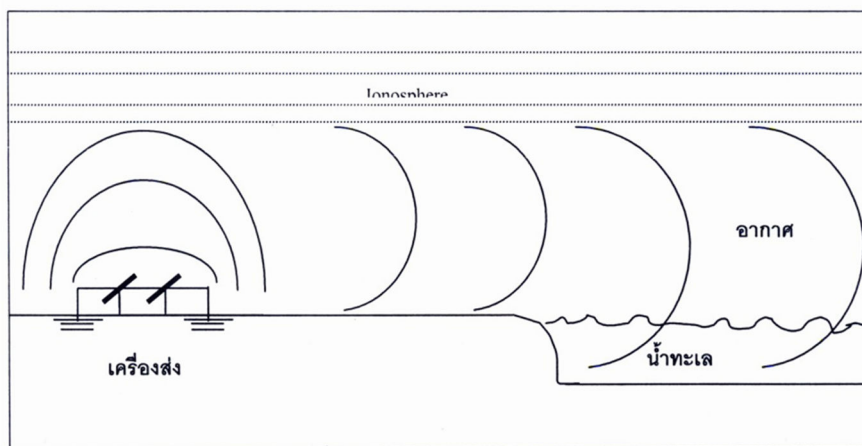
ย่านความถี่ ELF, VLF และ LF เป็นย่านความถี่ที่มีความถี่ต่ำมาก ๆ ในระดับที่ใกล้เคียงกับเสียงพูดของมนุษย์ มีคุณลักษณะตามตารางที่ ๑-๒

ตารางที่ ๑ - ๒ ความถี่และความยาวคลื่นของย่านความถี่ต่ำ ๆ

ย่านความถี่	ความถี่ (kHz)	ความยาวคลื่น (กม.)
Extremely Low Frequency (ELF)	๐.๐๓ - ๐.๓	๑๐,๐๐๐ - ๑,๐๐๐
Voice Frequency (VF)	๐.๓ - ๓.๐	๑,๐๐๐ - ๑๐๐
Very Low Frequency (VLF)	๓.๐ - ๓๐.๐	๑๐๐ - ๑๐
Low Frequency (LF)	๓๐ - ๓๐๐.๐	๑๐ - ๑

ความถี่ในย่าน VF เป็นความถี่เสียงที่มนุษย์สามารถรับฟังได้ จะไม่ใช้ในการสื่อสารทางวิทยุโดยทั่ว ๆ ไป แต่มีการใช้งานสำหรับ โซนาร์ (Sonar) หรือ โทรศัพท์ใต้น้ำ (Under Water Telephone) ซึ่งเป็นการแพร่กระจายคลื่นเสียงออกจากเครื่องส่ง โดยใช้น้ำเป็นตัวกลาง

ย่านความถี่ VLF และ LF จะมีคุณลักษณะพื้นฐานใกล้เคียงกัน มีชื่อเรียกรวมว่าย่านความถี่คลื่นยาว (Long Wave) การแพร่คลื่นจะเป็นลักษณะของ surface wave มีโพลาไรเซชันแนวตั้ง (Vertical Polarization) โดยมีพื้นผิวโลกและชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เป็นเสมือนท่อนำคลื่น (Terrestrial Wave Guide) และความสูงของท่อนำคลื่นนี้จะมีผลต่อความสามารถในการแพร่คลื่นของความถี่ในย่านนี้ โดยที่ความสูงของท่อนำคลื่นจะมีค่าแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับสภาพของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ในขณะนั้น โดยทั่วไปจะมีความสูงประมาณ ๗๐ กม.ในเวลากลางวัน และประมาณ ๙๐ กม.ในเวลากลางคืน โดยมีลักษณะการแพร่กระจายคลื่น ดังรูปภาพที่ ๑-๑๑



รูปภาพที่ ๑ - ๑๑ การแพร่กระจายคลื่นของย่านความถี่ ELF, VLF และ LF

การแพร่กระจายของคลื่นออกสู่อากาศนั้น ปัจจัยสำคัญที่กำหนดระยะทางที่สามารถใช้งานคลื่นความถี่นั้นได้ ปัจจัยหนึ่งคือ การถูกลดทอนสัญญาณ โดยที่การแพร่กระจายในลักษณะของ (surface wave) ของย่านความถี่ ELF, VLF และ LF การถูกลดทอนสัญญาณขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของพื้นผิวที่คลื่นแพร่กระจายผ่าน นั่นคือคุณสมบัติในการเป็นตัวนำของพื้นผิว (Conductivity) จะเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการลดทอนของสัญญาณดังกล่าว ซึ่งความถี่ในย่านนี้ทั้งหมดมีอัตราการถูกลดทอนน้อยขณะที่แพร่กระจายออกสู่อากาศ ส่วนพื้นผิวที่เป็นน้ำทะเลจะยังมีอัตราการลดทอนต่ำมาก

นอกจากนี้ ลักษณะเด่นของความถี่ในย่าน VLF และ ELF คือ ความสามารถในการทะลุทะลวงลงสู่ใต้น้ำได้ดี จึงสามารถนำไปใช้งานในการติดต่อสื่อสารกับเรือดำน้ำได้ โดยขีดความสามารถในการแพร่กระจายลงสู่ใต้น้ำดังตารางที่ ๑-๓



ความถี่ในย่านนี้สามารถแพร่กระจายไปได้ไกล จึงมักมีการใช้งานในการติดต่อสื่อสารระยะไกล และงานในระบบวิทยุนำเรือ เช่น ระบบ LORAN – C (Long Range Navigation) ใช้งานย่านความถี่ 100 kHz และระบบ OMEGA ย่านความถี่ 10 -14 kHz

ตารางที่ ๑ - ๓ ความสามารถในการแพร่กระจายคลื่นสู่ใต้ผิวน้ำของย่านความถี่ต่าง ๆ

ย่านความถี่	ความสามารถในการแพร่กระจายสู่ใต้ผิวน้ำ (ม.)
LF	๐.๕๖ – ๑.๕
VLF	๑.๕ – ๕.๖
VF	๕.๖ – ๑๕
ELF	๑๕ – ๕๖

### ๑.๓.๓.๒ ย่านความถี่ MF

มีความถี่อยู่ระหว่าง 300 – 3,000 kHz และความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง ๑๐๐ เมตร ถึง ๑ กิโลเมตร มีคุณลักษณะที่สามารถใช้งานได้ทั้งการสื่อสารในรูปแบบของคลื่นผิวพื้น (Surface Wave) และคลื่นฟ้า (Sky Wave) โดยในการใช้งานในลักษณะของคลื่นผิวน้ำนั้น การดูดกลืนของสัญญาณเมื่อแพร่กระจายออกสู่อากาศจะสูงกว่าย่านความถี่ LF ทำให้มีพื้นที่ครอบคลุมการใช้งานน้อยลง (แต่สามารถติดต่อได้ไกลหลายร้อยกิโลเมตร) ส่วนใหญ่ใช้ในกิจการวิทยุกระจายเสียงย่านความถี่ 1,456-1,647 kHz และการติดต่อสื่อสารเป็นพื้นที่ไม่กว้างมากนัก เช่น การสื่อสารโทรเลข/โทรศัพท์ของเรือในย่าน 405-525 kHz และ 1,600-3,800 kHz เป็นต้น

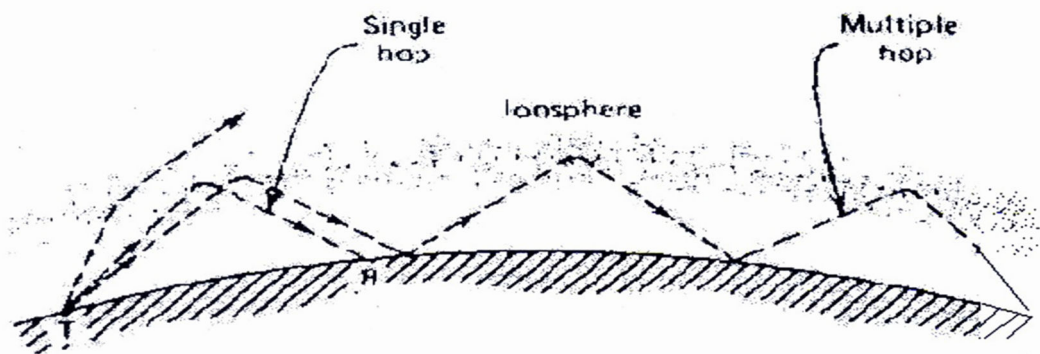
สำหรับการแพร่คลื่นในลักษณะของคลื่นฟ้านั้น ความถี่ในย่านนี้จะถูกดูดกลืนพลังงานโดย D – Layer ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ แต่ในเวลากลางคืนบรรยากาศชั้น D – Layer นี้จะเบาบางลงหรือไม่ปรากฏขึ้น ทำให้การสื่อสารในลักษณะของ Sky Wave สำหรับย่านความถี่ MF สามารถกระทำได้แต่ไม่เป็นที่นิยมในการใช้งาน

### ๑.๓.๓.๓ ย่านความถี่ HF

มีความถี่อยู่ระหว่าง 3 – 30 MHz เป็นย่านความถี่หลักสำหรับการติดต่อสื่อสารในระยะไกล ซึ่งสามารถสื่อสารได้ครอบคลุมทั่วโลก โดยสามารถแพร่กระจายคลื่นได้ใน ๒ ลักษณะคือ ทั้งคลื่นดิน (Ground Wave) และคลื่นฟ้า (Sky Wave) โดยคลื่นดินจะใช้ในการติดต่อสื่อสารในระยะที่ไม่ไกลนักเนื่องจากมีอัตราการดูดกลืนสูง จึงมักใช้งานกับสถานีวิทยุชายฝั่งที่แพร่กระจายคลื่นวิทยุผ่านพื้นผิวที่เป็นน้ำทะเล ซึ่งมีค่าความนำทางไฟฟ้าสูงช่วยให้อัตราการดูดกลืนน้อยลง จึงสามารถสื่อสารได้ในระยะทางที่ไกลมากขึ้น สำหรับคลื่นฟ้านั้น จะใช้ติดต่อสื่อสารในระยะไกลและสามารถติดต่อสื่อสารได้ทั่วโลก โดยอาศัยการสะท้อนกลับจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งอาจเป็นการสะท้อนเพียงครั้งเดียว (1 Hop) หรือสะท้อนกลับไปมาหลายครั้ง (Multi-Hop) ก็ได้ รูปภาพที่ ๑-๑๒ อีกทั้งสามารถใช้สายอากาศที่ออกอากาศได้ทั้งโพลาริเซชันแนวตั้งและแนวนอน นอกจากนี้ยังได้เปรียบย่านความถี่อื่น ๆ ในเรื่องของขนาด

ของสายอากาศ ซึ่งมีขนาดเล็กอยู่ในขนาดไม่กี่เมตร ทำให้เป็นระบบที่สะดวกและประหยัดในการติดต่อระยะไกล แต่การสื่อสารย่านความถี่ HF ด้วยคลื่นฟ้ามีความไม่แน่นอนสูง เนื่องจากต้องอาศัยชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นตัวช่วยในการสื่อสาร และชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ก็มีความแปรปรวนสูง ทำให้ผู้ที่ใช้งานต้องมีความเข้าใจในหลักการทำงานเป็นอย่างดี

การใช้งานส่วนใหญ่จะใช้คลื่นฟ้าในการติดต่อสื่อสารวิทยุโทรศัพท์ระหว่างชาติ, การกระจายเสียงวิทยุ และระบบสื่อสารเคลื่อนที่ของเครื่องบินหรือเรือเดินสมุทร



รูปภาพที่ ๑ - ๑๒ ภาพการสะท้อนของคลื่นกลับไปกลับมาระหว่างพื้นโลกกับชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

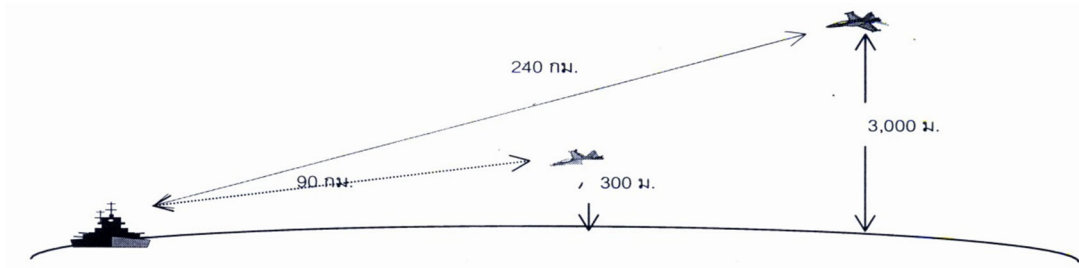
#### ๑.๓.๓.๔ ย่านความถี่ VHF และ UHF

ย่านความถี่ VHF มีความถี่อยู่ระหว่าง 30 – 300 MHz ส่วน UHF มีความถี่อยู่ระหว่าง 300 MHz ถึง 3 GHz ซึ่งทั้ง ๒ ย่านความถี่จะมีคุณสมบัติส่วนใหญ่ที่คล้ายคลึงกัน มีคุณลักษณะที่สำคัญดังนี้

- ❖ สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความร้อนจากการทำงานของอุปกรณ์ (Thermal Noise) มากกว่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ (Atmospheric Noise)

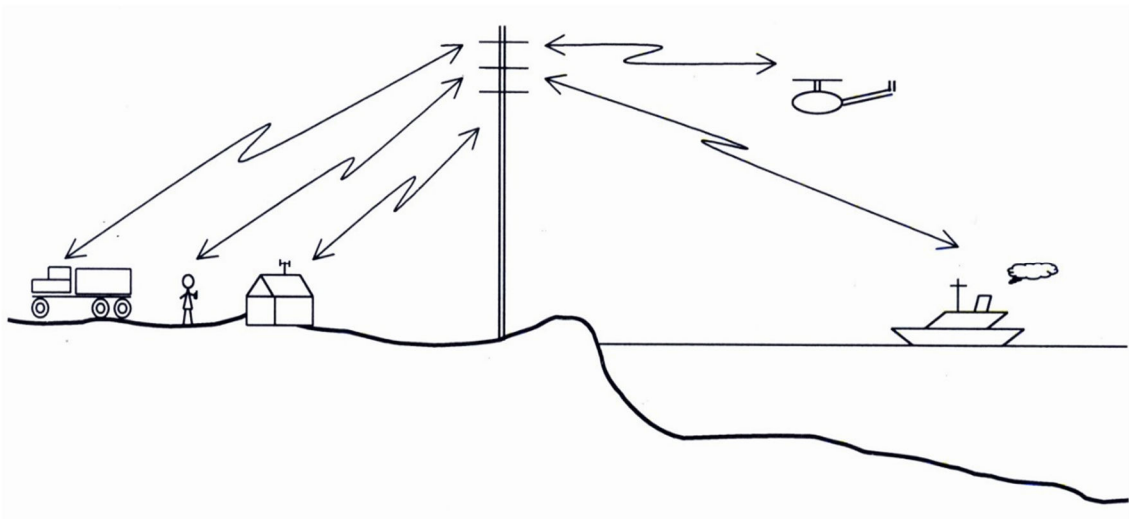
- ❖ ไม่มีผลกระทบจากบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ เนื่องจากเป็นความถี่ที่สูงจะทะลุทะลวงผ่านชั้นบรรยากาศนี้ และคลื่นความถี่จะเดินทางเป็นเส้นตรง จึงสามารถติดต่อกันได้ในระยะสายตาท่า่นั้น (คลื่นไม่เดินทางโค้งตามความโค้งของโลก) ระยะทางในการติดต่อสื่อสารจึงขึ้นอยู่กับความสูงของสายอากาศทั้งด้านรับและด้านส่ง ดังรูปภาพที่ ๑ - ๑๓ และรูปภาพที่ ๑ - ๑๔

- ❖ มีแบนด์วิดท์กว้างกว่าย่านความถี่ HF มาก รวมทั้งมีความยาวคลื่นน้อย ทำให้ขนาดของสายอากาศมีขนาดเล็ก และสามารถใช้งานการสื่อสารข้อมูลได้ดีกว่า



รูปภาพที่ ๑ - ๑๓ ระยะทางในการติดต่อสื่อสารขึ้นอยู่กับความสูงเสาอากาศ

การใช้งานส่วนใหญ่เป็นในลักษณะของแนวเส้นสายตา (Line-of-Sight) ในกิจการวิทยุกระจายเสียง, ระบบสื่อสารเคลื่อนที่บนพื้นดิน, อากาศ และมหาสมุทร, การแพร่ภาพสัญญาณโทรทัศน์ ดังรูปภาพที่ ๑-๑๔



รูปภาพที่ ๑ - ๑๔ การแพร่คลื่นในลักษณะแนวเส้นสายตาของ VHF

### ๑.๓.๓.๕ ย่านความถี่ SHF

ย่านความถี่นี้มีความถี่อยู่ระหว่าง 3 - 30 GHz มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง ๑๐ - ๑ เซนติเมตรซึ่งความยาวคลื่นจะมีขนาดอยู่ในระดับเดียวกับขนาดอนุภาคของ ฟน, เมฆ หรือ หิมะ ทำให้ถูกดูดซับพลังงานจากปรากฏการณ์ธรรมชาติเหล่านี้ได้ง่าย

การใช้งานในย่านความถี่นี้ใช้สำหรับการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูง, การติดต่อสื่อสารของยานอวกาศ, การใช้งานเรดาร์, การสื่อสารดาวเทียม เป็นต้น

### ๑.๓.๓.๖ ย่านความถี่ EHF

ย่านความถี่ EHF จะเริ่มจากย่านความถี่อินฟราเรด โดยมีความถี่อยู่ระหว่าง 30 - 300 GHz ความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง ๑๐ - ๑ มิลลิเมตร (Millimeter wave) ปัญหาของการใช้งานย่านความถี่นี้ยังคงเหมือนกับย่านความถี่ SHF สาเหตุจากความยาวคลื่นของมันมีขนาดเล็กมาก ปัจจุบัน

ใช้ในระบบวิทยุดาราศาสตร์ (Radio Astronomy), เรดาร์ การสื่อสารดาวเทียมสมัครเล่น และการวิจัยสำรวจทรัพยากร เป็นต้น

## ๑.๔ การแพร่กระจายคลื่น

การศึกษาเรื่องการแพร่คลื่นวิทยุมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับคุณสมบัติและผลกระทบอันเนื่องมาจากตัวกลางที่คลื่นวิทยุเดินทางผ่านไม่ว่าจะเป็นทางใดก็ตาม ระหว่างสายอากาศส่งจนถึงสายอากาศรับตัวกลางที่สำคัญได้แก่ชั้นบรรยากาศโลก ซึ่งมีลักษณะหรือรูปแบบที่แตกต่างกันตามความสูงเหนือพื้นโลก ตำบลที่ทางภูมิศาสตร์หรือช่วงเวลาเปลี่ยนแปลงไป (วัน, เดือน, ปี, ฤดูกาล) รูปแบบที่แตกต่างกันนี้เองที่มีอิทธิพลต่อการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังชั้นบรรยากาศโลก และเป็นพื้นฐานแรก que ผู้ศึกษาต้องมีความเข้าใจโดยชั้นบรรยากาศโลกแบ่งเป็น โทรโปสเฟียร์ (Troposphere) สตราโตสเฟียร์ (Stratosphere) และ ไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere)

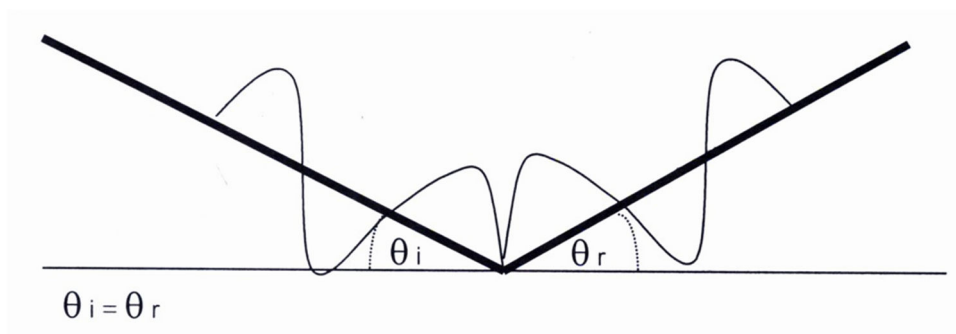
ชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์ เป็นชั้นบรรยากาศที่นับจากพื้นโลกจนกระทั่งถึงความสูงประมาณ ๑๑ กม. โดยชั้นนี้จะมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปตามความสูง ส่วนชั้นบรรยากาศสตราโตสเฟียร์เป็นชั้นบรรยากาศที่อยู่ระหว่าง โทรโปสเฟียร์ และไอโอโนสเฟียร์ โดยชั้นนี้มีอุณหภูมิเกือบจะคงที่ จนเรียกว่า ชั้นไอโซเทอร์มอล (Isothermal Region) ส่วนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์อยู่สูงเหนือชั้นบรรยากาศสตราโตสเฟียร์ขึ้นไปตั้งแต่ความสูง ๕๐ กม. ขึ้นไปถึงประมาณ ๒๕๐ กม. เหนือพื้นโลก ในชั้นนี้มีความเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิรวมทั้งมีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของประจุอิสระ ซึ่งมีอิทธิพลอย่างยิ่งต่อการใช้คลื่นวิทยุ

การเดินทางของคลื่นผ่านตัวกลางจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับนั้น อาจเป็นได้ทั้งแบบคลื่นดิน (Ground Wave) , คลื่นตรง (Direct Wave) และคลื่นฟ้า (Sky Wave) โดยคลื่นดิน และคลื่นตรงมักแพร่กระจายไปได้ระยะทางจำกัด คลื่นดินอาศัยคุณลักษณะทางไฟฟ้าของผิวพื้นโลก (พื้นดินและพื้นน้ำ), การเลี้ยวเบน (Bending) หรือการโน้มรอบวัตถุ (Diffraction) ไปตามความโค้งของผิวโลก ส่วนคลื่นตรงจะหักเห (Refraction) ของคลื่นไปตามความหนาแน่นของชั้นบรรยากาศ จึงทำให้สามารถแพร่กระจายไปได้ไกลเกินขอบฟ้า และคลื่นฟ้าแพร่กระจายไปได้ระยะไกลโดยอาศัยความนำทางไฟฟ้าของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นตัวหักเห หรือสะท้อนกลับของคลื่นกลับสู่พื้นโลกอีกครั้ง

### ๑.๔.๑ การสะท้อนของคลื่น (Reflection)

การสะท้อนเป็นคุณสมบัติเบื้องต้นของคลื่นวิทยุ โดยเมื่อคลื่นตกกระทบวัตถุหรือตัวกลางใด ๆ จะเกิดการสะท้อนกลับ โดยประสิทธิภาพการสะท้อนแตกต่างกันตามวัตถุหรือตัวกลางชนิดนั้น เช่น พื้นผิวโลหะ (ความนำไฟฟ้าดี) ที่มีขนาดใหญ่และเรียบจะเป็นตัวสะท้อนคลื่นได้ดี พลังงานของคลื่นตกกระทบ (Incident Wave) เกือบทั้งหมดจะสะท้อนกลับ ส่วนพื้นโลกเป็นตัวสะท้อนคลื่นที่ตีพอใช้ โดยเฉพาะคลื่นที่ตกกระทบด้วยมุมต่ำเมื่อเทียบกับแนวระนาบ รวมทั้งชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ก็ถือว่าเป็นตัวสะท้อนคลื่นวิทยุที่ตีพอใช้

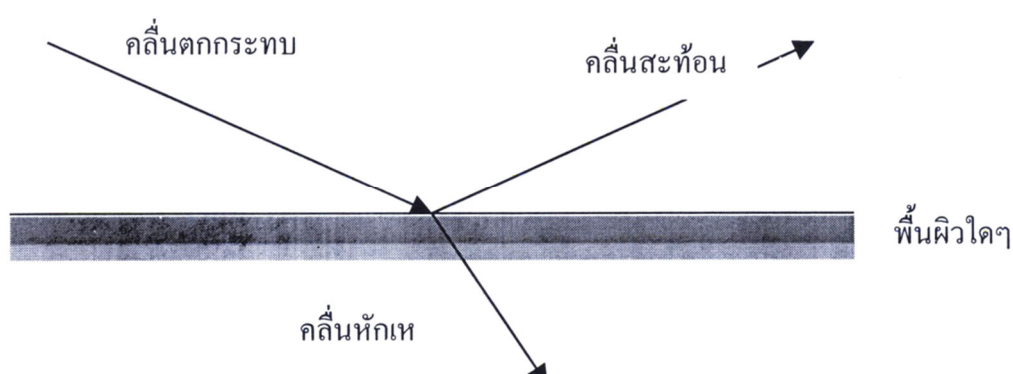
รูปภาพที่ ๑ - ๑๕ แสดงภาพการตกกระทบของหน้าคลื่น (Wave Front) แล้วสะท้อนกลับ โดยมีมุมตกกระทบ (Angle of Incident) และมุมสะท้อน (Angle of Reflection) มีขนาดเท่ากันเสมอ รวมทั้งคลื่นสะท้อนจะกลับเฟส หรือ เฟสต่างจากคลื่นตกกระทบ  $๑๘๐$  องศา ดังแสดงในภาพ



รูปภาพที่ ๑ - ๑๕ ภาพแสดงการกลับเฟสของคลื่นที่สะท้อนกับพื้นผิวใด ๆ

### ๑.๔.๒ การหักเหของคลื่น (Refraction)

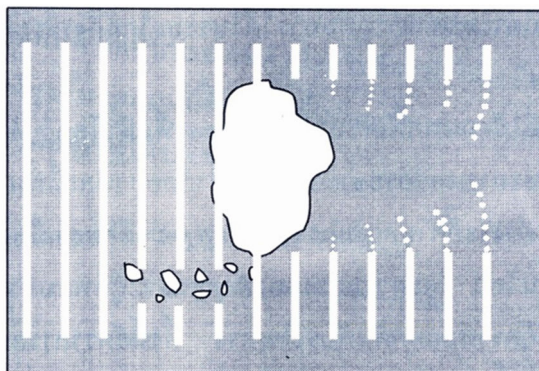
การหักเหเป็นปรากฏการณ์ของคลื่นที่ตกกระทบกับพื้นผิวใด ๆ ในมุมเฉียง (Oblique) และมีพลังงานของคลื่นบางส่วนทะลุลงไปในพื้นที่ผิวตกกระทบ แทนที่จะสะท้อนกลับทั้งหมด โดยความแตกต่างของความหนาแน่นของตัวกลาง ๒ ตัวกลางที่มีความแตกต่างจะทำให้คลื่นที่หักเหออกไปในตัวกลางหนึ่งมีความเร็วเปลี่ยนไปจึงเกิดการเลี้ยวเบนออกไป เช่น เมื่อคลื่นหักเหที่ตัวกลางที่เป็นน้ำ ความเร็วของคลื่นช้ากว่าคลื่นตกกระทบในอากาศ จะทำให้มุมเบนออกไปจากทิศทางคลื่นที่ตกกระทบและเฟสเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปภาพที่ ๑-๑๖



รูปภาพที่ ๑ - ๑๖ ภาพแสดงคลื่นที่ตกกระทบลงบนพื้นผิวใด ๆ เมื่อสะท้อนกลับจะมีพลังงานบางส่วนถูกดูดซับหรือหักเหลงไปในพื้นผิวนั้น ๆ เสมอ

### ๑.๔.๓ การโน้มรอบวัตถุ (Diffraction)

การโน้มรอบวัตถุเป็นปรากฏการณ์ที่คลื่นเดินทางรอบวัตถุหรือสิ่งกีดขวางโดยอาศัยการเลี้ยวเบนของคลื่น ตัวอย่างดังแสดงในรูปภาพที่ ๑ - ๑๗ คลื่นความถี่ต่ำหรือมีความยาวคลื่นมากจะสามารถเลี้ยวเบนได้ดีกว่าคลื่นความถี่สูงหรือมีความยาวคลื่นสั้น



รูปภาพที่ ๑ - ๑๗ ภาพแสดงคลื่นการโน้มรอบวัตถุของหน้าคลื่น (Wave Front)

### แบบของการแพร่กระจายคลื่น (Mode of Propagation)

แบบของการแพร่กระจายคลื่นสามารถแบ่งได้เป็น ๓ กลุ่มใหญ่ ๆ คือ คลื่นดิน (Ground Wave), คลื่นในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Space Wave in Troposphere) และคลื่นฟ้า (Sky Wave) โดยคลื่นดินหรือคลื่นผิวพื้น (Surface Wave) จะเป็นคลื่นที่เดินทางไปตามความโค้งของผิวโลกโดยอาศัยความนำทางไฟฟ้าของผิวโลก ส่วนคลื่นในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ประกอบด้วยคลื่นในแบบต่าง ๆ ที่มีได้มีการสะท้อนกลับจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ประกอบด้วยคลื่นตรง (Direct Wave), คลื่นสะท้อนพื้นดิน (Ground-reflected Wave) และคลื่นกระทบชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Tropospheric Wave) ส่วนคลื่นฟ้าจะกล่าวถึง การแพร่กระจายคลื่นที่เมื่อเดินทางตกกระทบชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แล้วเกิดการหักเหหรือสะท้อนกลับลงมายังพื้นโลก

#### ๑.๕.๑ การแพร่คลื่นดิน (Ground Wave Propagation)

การแพร่กระจายคลื่นดินในที่นี้จะหมายถึงการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับผ่านตัวกลางชั้นบรรยากาศโลก ที่ไม่ใช่การสะท้อนที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และผ่านตัวกลางผิวพื้นโลก โดยพื้นผิวโลกจะทำหน้าที่เป็น “วัสดุกึ่งตัวนำ” (Semi Conductor) ที่พลังงานของคลื่นเมื่อเดินทางผ่านจะสามารถถูกดูดซับและเปลี่ยนรูปแบบกลายเป็นพลังงานความร้อนในที่สุด ด้วยอัตราการสูญเสียที่เพิ่มขึ้นตามความถี่ของคลื่นที่เพิ่มขึ้น ทำให้การแพร่กระจายคลื่นดินถูกจำกัดด้วยระยะทาง โดยการใช้ความถี่ต่ำจะสามารถสื่อสารได้ในระยะใกล้ถึงระยะกลางเท่านั้น และระยะทางจะยิ่งลดลงอีกเมื่อใช้ความถี่สูงขึ้น

คลื่นผิวพื้นเป็นคลื่นที่ใช้คุณสมบัติความนำไฟฟ้าของพื้นผิวโลก ทำให้คลื่นเดินทางไปได้ตามส่วนโค้งของผิวโลก ลักษณะการแพร่กระจายคลื่นนี้ได้จำกัดอยู่เพียงที่พื้นโลกเท่านั้น แต่ขยายขึ้นไปถึงที่ความสูงระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตามความแรงของสัญญาณจะลดลงเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น พลังงานของคลื่นจะถูกดูดซับ

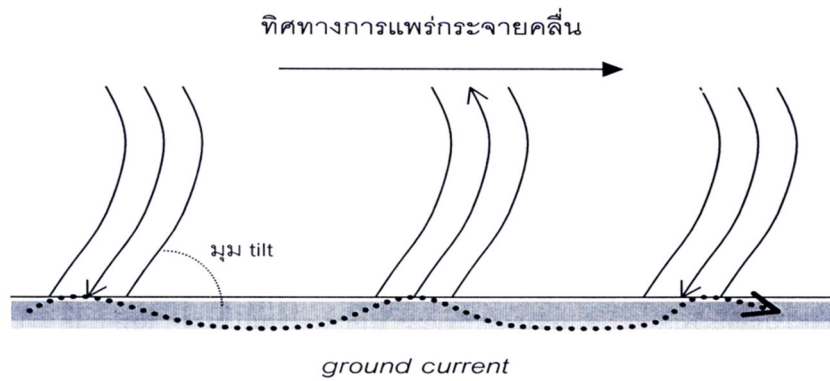
โดยพื้นโลก ความแรงของสัญญาณจะถูกลดทอนมากกว่าเมื่อคลื่นเดินทางในอากาศที่อัตราการลดทอนมีส่วน ผกผันกับระยะทาง ทั้งนี้อัตราการลดทอนจะขึ้นอยู่กับค่าความนำไฟฟ้าของพื้นผิวชนิดนั้น ๆ พื้นผิวที่มีความนำ ไฟฟ้าสูง อัตราการลดทอนจะต่ำ จึงทำให้คลื่นเดินทางไปได้ไกลกว่าพื้นผิวที่มีความนำไฟฟ้าต่ำ ตามตัวอย่างใน ตารางที่ ๑ - ๔

จากตารางข้อมูลจะเห็นได้ว่าน้ำทะเลเป็นพื้นผิวที่มีความนำไฟฟ้าดีที่สุด การสื่อสารด้วย คลื่นผิวพื้นในทะเลจึงสามารถติดต่อได้ในระยะไกลขึ้น ส่วนป่าดงดิบเป็นพื้นผิวที่คลื่นผิวพื้นไม่สามารถจะเดิน ทางผ่านไปได้

ตารางที่ ๑ - ๔ ค่าความนำไฟฟ้าของพื้นผิวชนิดต่าง ๆ

ชนิดของพื้นผิว	Relative Conductivity	Dielectric Constant
น้ำทะเล	ดี	๘๐
น้ำจืด	พอใช้	๘๐
พื้นดินชื้น	พอใช้	๓๐
พื้นดินเรียบ	พอใช้	๑๕
พื้นผิวเป็นสูง-ต่ำ , แห้ง	ไม่ดี	๗
ทะเลทราย	ไม่ดี	๔
ป่าดงดิบ	ใช้ไม่ได้เลย	-

การใช้สายอากาศแนวตั้งที่แพร่กระจายคลื่นในแบบโพลาไรเซชันทางตั้ง (Vertical Polarization) เหมาะสมกับคลื่นผิวพื้น เนื่องจากการใช้โพลาไรเซชันทางนอนจะทำให้เกิดรูปแบบวงจรต่อลงดิน (Short-Circuit) ทำให้คลื่นไม่สามารถสร้างกระแสดิน (Ground Current) เพื่อส่งถ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ ในทาง กลับกันการใช้โพลาไรเซชันทางตั้งจะทำให้เกิดความต้านทานขึ้นในวงจร จึงทำให้สามารถถ่ายทอดพลังงานใน พื้นผิวโลกได้ ดังแสดงในรูปที่ ๑-๑๘ พื้นผิวที่เป็นตัวนำที่ดีจะสามารถถ่ายทอดพลังงานได้ดี และมีการสูญเสีย น้อยกว่าตัวนำที่ไม่ดี การสูญเสียพลังงานที่พื้นผิวจะหวังมิให้หน้าคลื่น (Wave Front) บริเวณพื้นผิวเคลื่อนที่ ไปได้ ทำให้หน้าคลื่นเกิดการเบนลงไปข้างหน้า เรียกมุมเบนลงนี้ว่า “Forward Tilt” ดังนั้นพื้นผิวที่เป็น ประเภทตัวนำที่ไม่ดีจะทำให้หน้าคลื่นเกิดมุมเบนมากกว่าตัวนำที่ดี รวมทั้งเมื่อเกิดความถี่สูงขึ้น มุมเบนนี้ก็จะ เพิ่มขึ้นด้วย ดังแสดงในตารางที่ ๑ - ๕ นั่นคือที่ความถี่สูงขึ้นการติดต่อกับคลื่นผิวพื้นจะใช้ได้ระยะทางลดลง



รูปภาพที่ ๑ - ๑๘ ภาพแสดงการเกิดมุม Tilt

ตารางที่ ๑.๕ มุม Tilt กับความถี่และชนิดของพื้นผิว

ความถี่ (MHz)	มุม Tilt บนน้ำทะเล	มุม Tilt บนพื้นดินแห้ง
๐.๐๒	๐° ๒.๕'	๕° ๑๘.๐'
๐.๒	๐° ๘.๐'	๑๓° ๓๐.๐'
๒.๐	๐° ๒๕.๐'	๓๒° ๑๒.๐'
๒.๐๐	๑° ๒๓.๐'	๓๕°

### ๑.๕.๒ การแพร่คลื่นในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Space Wave in Troposphere)

ในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ประกอบด้วยเส้นทางของคลื่นต่าง ๆ ได้แก่ คลื่นตรง, คลื่นสะท้อนพื้นดิน และคลื่นกระทบชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ดังนั้นความเข้มหรือความแรงของคลื่นในชั้นบรรยากาศนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น กำลังส่ง, คุณลักษณะของสายอากาศ, ความถี่ใช้งาน, ความชื้นในชั้นบรรยากาศ หรือลักษณะทางอุตุนิยมวิทยาอื่น ๆ นั่นคือ ความเข้มหรือความแรงของสัญญาณ ณ ภาครับ เป็นผลรวมของคลื่นแบบต่าง ๆ การสื่อสารในย่านความถี่ VHF และ UHF ใช้คุณสมบัติของการแพร่คลื่นแบบนี้ โดยอาจเกี่ยวข้องกับกระบวนการต่าง ๆ ได้แก่ การสะท้อนจากพื้นดิน (หรือสิ่งกีดขวางอื่น), การหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์, การโน้มรอบสิ่งกีดขวางระหว่างเส้นทางการแพร่คลื่น ตลอดจนการกระจาย (Scattering) และการจางหาย (Fading) ของคลื่นในชุมชนเมือง

#### ๑.๕.๒.๑ คลื่นตกกระทบชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Tropospheric

#### Wave)

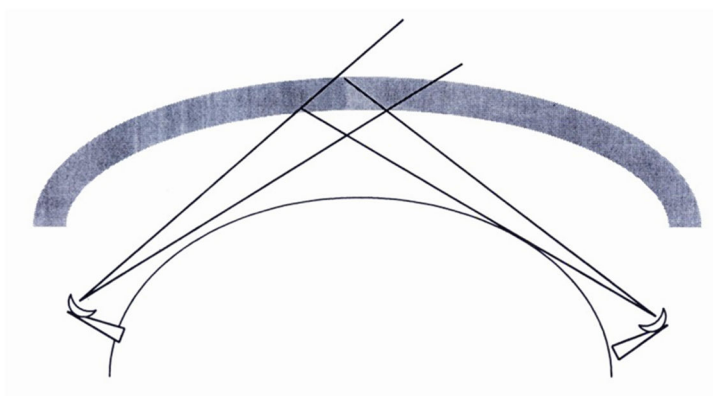
คลื่นตกกระทบชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์เป็นคลื่นที่เดินทางจากพื้นโลกขึ้นไปยังชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ด้วยมุมที่เหมาะสมแล้วเกิดการหักเห (Refraction) ณ จุดที่ชั้นบรรยากาศมีการเปลี่ยนแปลงความชื้น, ความหนาแน่น หรือ อุณหภูมิ อย่างรวดเร็ว เรียกว่า “Steep Gradients” ซึ่งจะ ทำให้ชั้นบรรยากาศขาดความต่อเนื่องในดัชนีหักเห พลังงานบางส่วน of คลื่นวิทยุจึงสามารถสะท้อนหรือหักเห



กลับมายังพื้นโลกอีกครั้งได้ การสื่อสารโดยคลื่นแบบนี้จึงสามารถใช้งานได้ในระยะทางไกลเกินเส้นขอบฟ้า โดยใช้ความถี่สูงกว่า 50 MHz ขึ้นไป ในทางปฏิบัติใช้ความถี่ 350 – 450 MHz, 755 – 985 MHz, 1,700 – 2,400 MHz และ 4,500 – 5,000 MHz โพลาริเซชันของการแพร่คลื่นแบบนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นสายอากาศรับและส่งจึงต้องใช้โพลาริเซชันแบบเดียวกันเสมอ

สาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหก็คือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ซึ่งเป็นผลมาจากมวลอากาศอุ่นเข้าแทนที่มวลอากาศเย็น, ความกดอากาศ, การเปลี่ยนอุณหภูมิอย่างรวดเร็วเมื่อดวงอาทิตย์ลับขอบฟ้า และการสร้างความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบชั้นบนของเมฆ การแพร่กระจายคลื่นแบบนี้จึงขึ้นกับลักษณะอากาศที่มีการเปลี่ยนแปลงนาฬิกาที่ต่อเนื่อง ทำให้มีโอกาสที่จะเกิดการจางหาย (Fading) ของคลื่น หรือเปลี่ยนแปลงความเข้มได้ตลอดเวลา

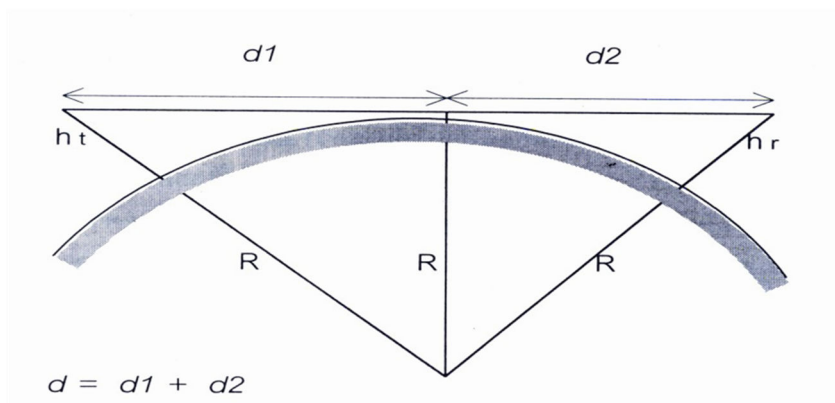
ปรากฏการณ์ของการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศในบางครั้งก็กระจุกตัวในลักษณะต่อเนื่องกันที่ความสูงจากพื้นโลกเท่า ๆ กัน (๑๐๐ – ๕๐๐ ฟุต) โดยเฉพาะในเขตเส้นศูนย์สูตรหรือเขตที่มีความชื้นสูง ทำให้คลื่นสามารถเดินทางได้ในลักษณะขนานกับพื้นโลก หรือเป็นท่อนำคลื่น (Duct) โดยคลื่นมีการสูญเสียพลังงานน้อยมากเมื่อเทียบกับการแพร่คลื่นโดยปกติในอากาศที่สูญเสียเป็นอัตราส่วนผกผันกับระยะทางกำลังสอง ซึ่งในบางพื้นที่ทำให้การสื่อสารสามารถกระทำได้ในระยะทางหลายพันไมล์



รูปภาพที่ ๑ - ๑๙ การสื่อสารด้วยคลื่นที่กระจายมาจากชั้นบรรยากาศ  
ทรอโปสเฟียร์ (Tropospheric Scatter)

### ๑.๕.๓ การแพร่คลื่นตรง (Direct Wave)

การแพร่กระจายคลื่นตรง ได้แก่ คลื่นที่เดินทางจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับ จึงถูกจำกัดด้วยระยะทางที่ไม่เกินเส้นขอบฟ้าวิทยุ (Radio Horizon) หรือตามแนวเส้นสายตา (Line-of-Sight) โดยคลื่นวิทยุเดินทางไปได้ไกลเกินกว่าเส้นขอบฟ้า หรือแนวเส้นสายตา เนื่องจากการเลี้ยวเบนในชั้นบรรยากาศโลกและการเพิ่มความสูงของสายอากาศรับและส่ง



รูปภาพที่ ๑ - ๒๐ ภาพการสื่อสารแบบตามแนวเส้นสายตา (Line-of-Sight)

จากรูปภาพที่ ๑ - ๒๐ สามารถแสดงวิธีคำนวณระยะขอบฟ้าวิทยุได้ดังต่อไปนี้

$$d_1^2 = (h_t + R)^2 - R^2 = h_t^2 + 2h_tR \approx 2h_tR, R \text{ มากกว่า } h_t \text{ มากๆ}$$

$$d_2^2 = (h_r + R)^2 - R^2 = h_r^2 + 2h_rR \approx 2h_rR, R \text{ มากกว่า } h_r \text{ มากๆ}$$

$$\therefore d = d_1 + d_2, d = \sqrt{2R}(\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r})$$

$$R \approx 8500 \text{ กม.}$$

$$d = 4.12(\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r}) \text{ กม.}$$

$h_t, h_r$  แสดงความสูงของสายอากาศส่ง และสายอากาศรับเหนือพื้นโลก

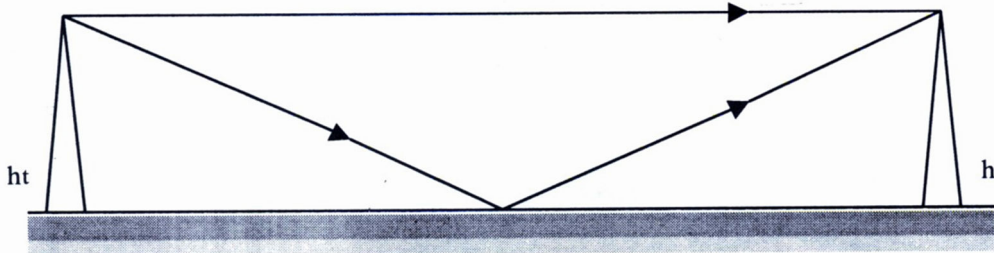
$d$  เป็นระยะขอบฟ้าวิทยุ

$R$  เป็นรัศมีประสิทธิผลของโลก (effective radius of earth) ซึ่งคิดรวม

คุณสมบัติการหักเหของคลื่นในชั้นบรรยากาศด้วย

### ๑.๕.๔ คลื่นสะท้อนพื้นดิน (Ground-reflected Wave)

คลื่นสะท้อนพื้นดิน ได้แก่คลื่นที่เดินทางมาถึงสายอากาศรับ หลังจากที่มีการสะท้อนมาจากพื้นดินหรือพื้นน้ำ โดยคลื่นสะท้อนจะมีเฟสต่างจากคลื่นตรง ๑๘๐ องศา ลักษณะเช่นนี้จะทำให้คลื่นที่เดินทางมาถึงสายอากาศรับมีเฟสต่างกัน โดยเฉพาะคลื่นสะท้อนพื้นดินที่ต้องใช้เวลาเดินทางมากกว่า จึงทำให้ภาครับจะรับสัญญาณที่มีเฟสเลื่อนออกไปมากกว่า ๑๘๐ องศา ซึ่งภาครับต้องสามารถกำจัดคลื่นในส่วนนี้ออกไป รวมทั้งในทางปฏิบัติสามารถทำได้โดยการเพิ่มความสูงของสายอากาศเพื่อลดความแตกต่างกันระหว่างเฟสของคลื่นตรงและคลื่นสะท้อนพื้นดิน ความแตกต่างของเฟสนี้จะทำให้คลื่นทั้งสองส่วนมีทั้งส่วนเสริม (เมื่อคลื่นเฟสตรงกัน) และส่วนหักล้าง (เมื่อคลื่นเฟสต่างกัน ๑๘๐°) ซึ่งถือว่าการรบกวนทางการสื่อสารอย่างหนึ่ง สามารถแสดงความแรงของสัญญาณได้ดังนี้



รูปภาพที่ ๑ - ๒๑ การเดินทางของคลื่นตรงและคลื่นสะท้อนบนพื้นโลกเรียบ (Flat Earth Surface)

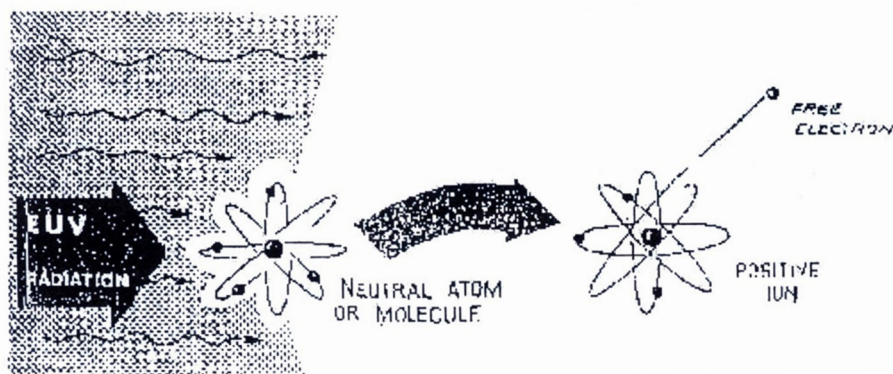
การสะท้อนของคลื่นที่มีต่อระดับสัญญาณที่ภาครับที่ตั้งอยู่ตามระยะทางต่าง ๆ ระหว่าง ๑ - ๑,๐๐๐ กม. ซึ่งจะพบการจางหาย (Fading) ของสัญญาณเป็นช่วง ๆ เมื่อระยะห่างระหว่างสถานีรับและส่งเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะมีผลกระทบมากในการติดต่อสื่อสารย่านความถี่ VHF/UHF ระหว่างสถานีภาคพื้นดินกับอากาศยาน

### ๑.๕.๕ การแพร่กระจายคลื่นฟ้า (Sky Wave Propagation)

การแพร่กระจายคลื่นฟ้าเป็นการสร้างเส้นทางการเดินทางของคลื่นระหว่างสายอากาศส่งและรับ โดยผ่านการหักเหหรือสะท้อนที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งโดยพื้นฐานแล้วการสื่อสารจะประสบความสำเร็จได้ก็ต่อเมื่อภาครับสามารถรับคลื่นที่เดินทางมาถึงได้ด้วยความแรงสัญญาณเหนือระดับสัญญาณรบกวน (Noise Floor) ที่ปรากฏที่ภาครับ เพื่อให้ติดต่อได้ตามเงื่อนไขชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นตัวแปรสำคัญ เนื่องจากสามารถรองรับคลื่นที่เดินทางตกกระทบได้ในช่วงความถี่หนึ่งเท่านั้น โดยความถี่สูงสุดที่รองรับได้ เรียกว่า MUF (Maximum Usable Frequency) ส่วนความถี่ต่ำสุดที่จะรองรับได้ เรียกว่า LUF (Lowest Usable Frequency) ทั้งนี้จะมีค่าเฉพาะสำหรับเส้นทางคู่ใดคู่หนึ่งเท่านั้น ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นเขตควบคุมการหักเหของคลื่นวิทยุที่ส่งขึ้นมาจากโลกให้กลับลงสู่พื้นโลกอีกครั้ง รวมทั้งจะกล่าวถึงเส้นทางการเดินทางของคลื่นวิทยุผ่านชั้นบรรยากาศและผลกระทบต่อติดต่อสื่อสารวิทยุด้วย

#### ๑.๕.๕.๑ ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ในยุคเริ่มต้นมีความเชื่อกันว่า การแพร่คลื่นวิทยุนั้นจะถูกจำกัดโดยความโค้งของส่วนโลก ซึ่งทำให้คลื่นวิทยุสามารถแพร่กระจายไปได้ในขอบเขตจำกัดในแนวเส้นสายตา (Line-of-Sight) หลังจากนั้นไม่นานนัก บริษัทมารโคนี ได้ทดลองแพร่คลื่นวิทยุย่านความถี่ HF ซึ่งสามารถแพร่คลื่นไปได้ไกลกว่า ๑,๐๐๐ กิโลเมตร ทำให้นักวิทยาศาสตร์สมัยนั้นเชื่อกันว่าชั้นบรรยากาศมีคุณสมบัติสามารถสะท้อนคลื่นวิทยุย่านความถี่ HF ได้ ต่อมานักวิทยาศาสตร์ชื่อ แอปพลีตัน ได้ทำการวิจัยและพบว่าชั้นบรรยากาศดังกล่าวมีจริงและได้ตั้งชื่อชั้นบรรยากาศนั้นว่า “ไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere)”



รูปภาพที่ ๑ - ๒๒ ขบวนการ Photoionization

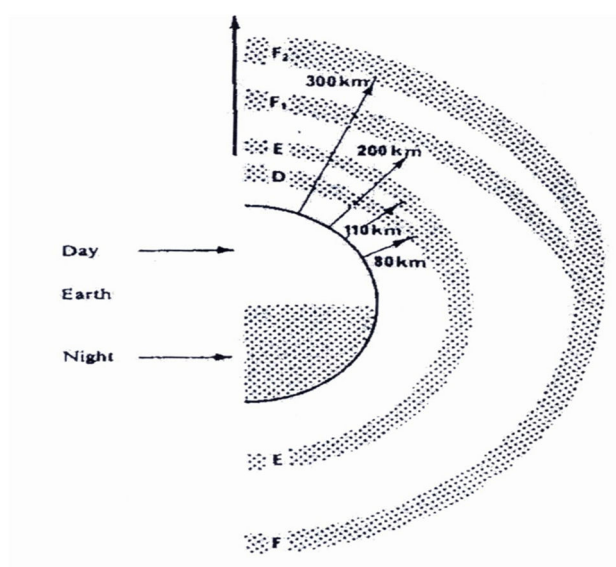
คุณสมบัติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นชั้นบรรยากาศที่มีความสูงเริ่มจาก ๖๐ กิโลเมตรโดยประมาณ จนถึง ๕๐๐ กิโลเมตร ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ประกอบด้วยโมเลกุลของสารต่าง ๆ ในอากาศมากมาย เช่น  $O_2$ ,  $N_2$  เป็นต้น เมื่อโมเลกุลดังกล่าวได้รับพลังงานจากดวงอาทิตย์แล้วจะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของอิเล็กตรอนออกจากโมเลกุลนั้น ๆ อนุภาคดังกล่าวมีคุณสมบัติเป็นไอออน และมีอิเล็กตรอนวิ่งอยู่รอบ ๆ บริเวณนั้น ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Ionized Media กระบวนการดังกล่าวเรียกว่าการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวออกเป็นไอออน (Photoionization) ดังรูปภาพที่ ๑.๒๒ แหล่งของการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวมาจากดวงอาทิตย์ ซึ่งมีรังสีอยู่ ๒ ชนิด คือ รังสี EUV (Extreme Ultra Violet) และรังสี X การเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวออกเป็นไอออนของอนุภาคต่าง ๆ ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีปริมาณที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับความสูงของชั้นไอโอโนสเฟียร์, ความเข้มของรังสี EUV และรังสี X ที่ได้รับจากดวงอาทิตย์ รวมถึงความหนาแน่นของจำนวนโมเลกุลที่สามารถแตกตัวออกเป็นไอออนได้ (Ionizable Components)

ตอนบนสุดของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ความเข้มของรังสี EUV จะมากในขณะที่ความหนาแน่นของจำนวนโมเลกุลที่สามารถแตกตัวเป็นไอออนได้จะเบาบาง ดังนั้นความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (Electron Density) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการแตกตัวออกเป็นไอออนในชั้นนี้จึงเบาบาง ในขณะที่บริเวณด้านล่างของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ความหนาแน่นของจำนวนโมเลกุลมีค่อนข้างมากแต่ความเข้มของรังสี EUV จากดวงอาทิตย์จะน้อย จึงส่งผลให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเบาบางเช่นเดียวกัน ตำแหน่งที่อยู่ระหว่างชั้นบรรยากาศตอนบนกับตอนล่างนั้นความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจะมากที่สุด

ดังนั้นในเวลากลางวัน ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ แบ่งออกได้เป็น ๔ ชั้นด้วยกัน ดังนี้

D - Layer	ความสูงโดยประมาณ	๖๐ - ๘๐ กิโลเมตร
E - Layer	ความสูงโดยประมาณ	๘๐ - ๑๖๐ กิโลเมตร
F1 - Layer	ความสูงโดยประมาณ	๑๖๐ - ๒๑๐ กิโลเมตร
F2 - Layer	ความสูงโดยประมาณ	> ๒๑๐ กิโลเมตร

ชั้นบรรยากาศถูกแบ่งออกตามความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ตามรูปภาพที่ ๑.๒๓ นั้น F2 - Layer เป็นชั้นบรรยากาศที่มีปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมากที่สุดเมื่อเทียบกับชั้นบรรยากาศอื่น ในเวลากลางคืนจะปรากฏเฉพาะ F2 - Layer ที่ความสูง มากกว่า ๒๐๐ กิโลเมตร ส่วนชั้นอื่น ๆ จะหายไป สาเหตุเพราะว่าไอออนที่ปรากฏใน F2 - Layer ส่วนมาก คือ Atomic Oxygen,  $O^+$  ซึ่งเมื่อรวมตัวกับอิเล็กตรอนแล้วกลายเป็นโมเลกุลที่เป็นกลางได้ช้ากว่า Molecular Oxygen,  $O_2^+$  และ Nitric Oxide,  $NO^+$  ที่พบมากในชั้น E และ F1 จึงทำให้ชั้น F2 ยังคงมีไอออนและอิเล็กตรอนเพียงพอที่จะทำให้เกิดการสะท้อนของคลื่นกลับสู่พื้นโลกได้ กระบวนการรวมตัวของอิเล็กตรอนนี้ เรียกว่า Recombination Process ดังนั้น F2 - Layer จึงเป็นส่วนหนึ่งของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่สำคัญที่สุดสำหรับการสะท้อนคลื่นวิทยุย่านความถี่ HF เนื่องจาก F2 - Layer นี้จะปรากฏอยู่บริเวณที่สูงที่สุดของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ทำให้สามารถติดต่อสื่อสารในระยะพันเส้นขอบฟ้าได้ และสามารถติดต่อสื่อสารได้ระยะทางไกลที่สุด อีกทั้งเป็นชั้นบรรยากาศที่ปรากฏตลอด ๒๔ ชั่วโมง ดังนั้น การดำรงสภาพทางการสื่อสารจึงมีประสิทธิภาพสูงสุด

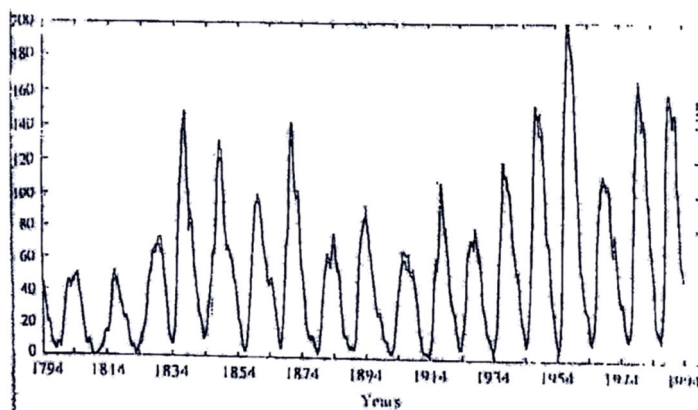


รูปภาพที่ ๑ - ๒๓ การปรากฏของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในเวลากลางวันและกลางคืน

### ๑.๔.๔.๒ ความผันผวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

#### (Ionosphere Variation)

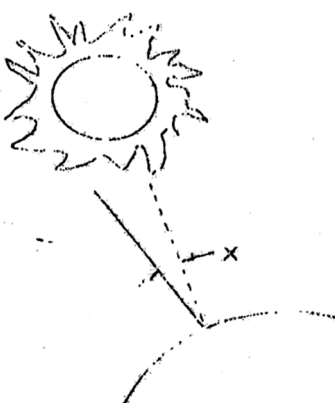
จากที่กล่าวในเบื้องต้นแล้ว ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเข้มของรังสีจากดวงอาทิตย์ (Solar Controlled) ซึ่งรังสีที่แผ่ออกมาจากดวงอาทิตย์จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์ (Sunspot Number) ซึ่งมักจะพบในบริเวณที่ดวงอาทิตย์มีอุณหภูมิสูงมากและสนามแม่เหล็กมีความเข้มมาก ความเข้มของรังสี EUV ที่แผ่มาจากดวงอาทิตย์นั้นแปรเปลี่ยนไปตามจุดดับบนดวงอาทิตย์ โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงไปในวงรอบ ๑๑ ปี รูปภาพที่ ๑ - ๒๔ กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ความถี่ที่ใช้ในการรับ - ส่งสัญญาณคลื่นวิทยุ HF จะขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของจุดดับบนดวงอาทิตย์เป็นวงรอบ ๑๑ ปี



รูปภาพที่ ๑ - ๒๔ วงรอบ Sunspot Number ของดวงอาทิตย์

คุณสมบัติที่สำคัญของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ต่อการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุก็คือความสามารถในการหักเหคลื่นวิทยุกลับมายังโลกได้ เมื่อโมเลกุลของอนุภาคต่างๆ ในชั้นบรรยากาศนี้ได้รับพลังงานจากดวงอาทิตย์ จะส่งผลให้อิเล็กตรอนเกิดการสั่นและพยายามทำให้ตัวมันเองหลุดออกมาจากวงโคจรของโมเลกุลนั้นๆ ความถี่ในการสั่นสะเทือนนี้เรียกว่า Plasma Frequency ( $f_p$ ) ซึ่งก็คือความถี่วิกฤต (Critical Frequency) นั่นเอง

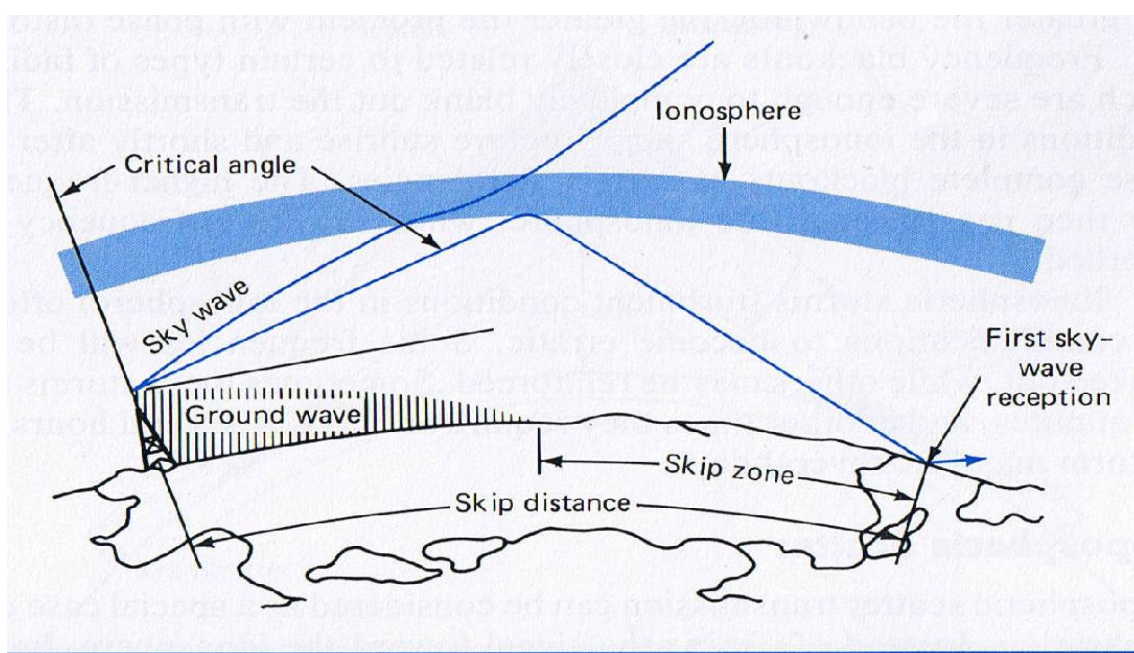
ข้อจำกัดอีกประการหนึ่งของความถี่ที่ใช้ส่งคลื่นวิทยุย่าน HF ก็คือการเปลี่ยนแปลงประจำวันของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Diurnal Variation) ในช่วงเวลากลางวัน ซึ่งเป็นช่วงที่ดวงอาทิตย์อยู่ใกล้กับพื้นผิวโลกมากที่สุด จะส่งผลให้อัตราการแตกตัวของโมเลกุลเป็นอิเล็กตรอนสูงที่สุด ดังนั้น ความถี่ของ plasma จะสูงที่สุด และความถี่ที่ใช้ส่งคลื่นวิทยุ นั้น ๆ สูงที่สุดด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ยังมีผลจากการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล (Seasonal Variation) โดยในช่วงฤดูร้อน มุมเงยระหว่างดวงอาทิตย์กับพื้นผิวโลก (Zenith Angle :  $\chi$ ) จะแคบกว่าในช่วงฤดูหนาวตามรูปภาพที่ ๑ - ๒๕ รังสีที่แพร่มาจากดวงอาทิตย์มากระทบชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จึงมีความเข้มมากกว่า ดังนั้นในช่วงฤดูร้อนอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะมีจำนวนมากกว่าและส่งผลให้ความถี่ใช้งานสูงขึ้น



รูปภาพที่ ๑ - ๒๕ ภาพแสดงมุม Zenith Angle ( $\chi$ ) ซึ่งมีค่าแตกต่างกันตามฤดูกาล

### ๑.๔.๔.๓ เส้นทางแพร่คลื่นฟ้า

เส้นทางการแพร่กระจายคลื่นฟ้าจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ อาจมีหลายเส้นทางขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของชั้นบรรยากาศขณะนั้นว่าจะสามารถรองรับความถี่นั้นได้อย่างเหมาะสมหรือไม่ ความถี่ที่เหมาะสมจะสามารถหักเหกลับมายังพื้นโลกที่สายอากาศรับได้ ระยะทางจากสายอากาศส่งไปยังจุดแรกที่คลื่นฟ้าสามารถหักเหมายังพื้นโลกได้ เรียกว่า ระยะกระโดด (Skip Distance) ส่วนย่านกระโดด (Skip Zone) ได้แก่ ย่านที่ไม่สามารถติดต่อได้ด้วยคลื่นวิทยุทั้งคลื่นดินและคลื่นฟ้า ดังแสดงในรูปภาพที่ ๑ - ๒๖ ดังนั้น เมื่อระยะกระโดดของคลื่นฟ้าน้อยกว่าระยะเดินทางของคลื่นดิน หรือขอบในของย่านกระโดดแล้ว จะพบว่า ณ จุดนั้นจะมีทั้งส่วนของคลื่นฟ้าและคลื่นดินซึ่งมีความแรงของสัญญาณใกล้เคียงกัน แต่จะมีเฟส (Phase) แตกต่างกัน นั่นคือคลื่นจะมีทั้งส่วนที่เกิดการหักล้างหรือเสริมกันของสัญญาณในจุดนี้ ทำให้เกิดมีการจางหาย (Fading) ของสัญญาณในจุดนี้ขึ้น ในทางทฤษฎีแล้วการใช้ความถี่สูงเกินกว่าความถี่วิกฤต (Critical Frequency) จะเริ่มเกิดระยะกระโดด ซึ่งเมื่อใช้ความถี่สูงขึ้นจะมีระยะกระโดดมากขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการรองรับความถี่ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ขณะนั้นด้วย หรืออีกนัยหนึ่งคือย่านกระโดดจึงขึ้นกับระยะการแพร่กระจายของคลื่นดินและจะไม่ปรากฏย่านกระโดดเมื่อคลื่นดินแพร่ไปได้ไกลเท่ากับระยะกระโดด

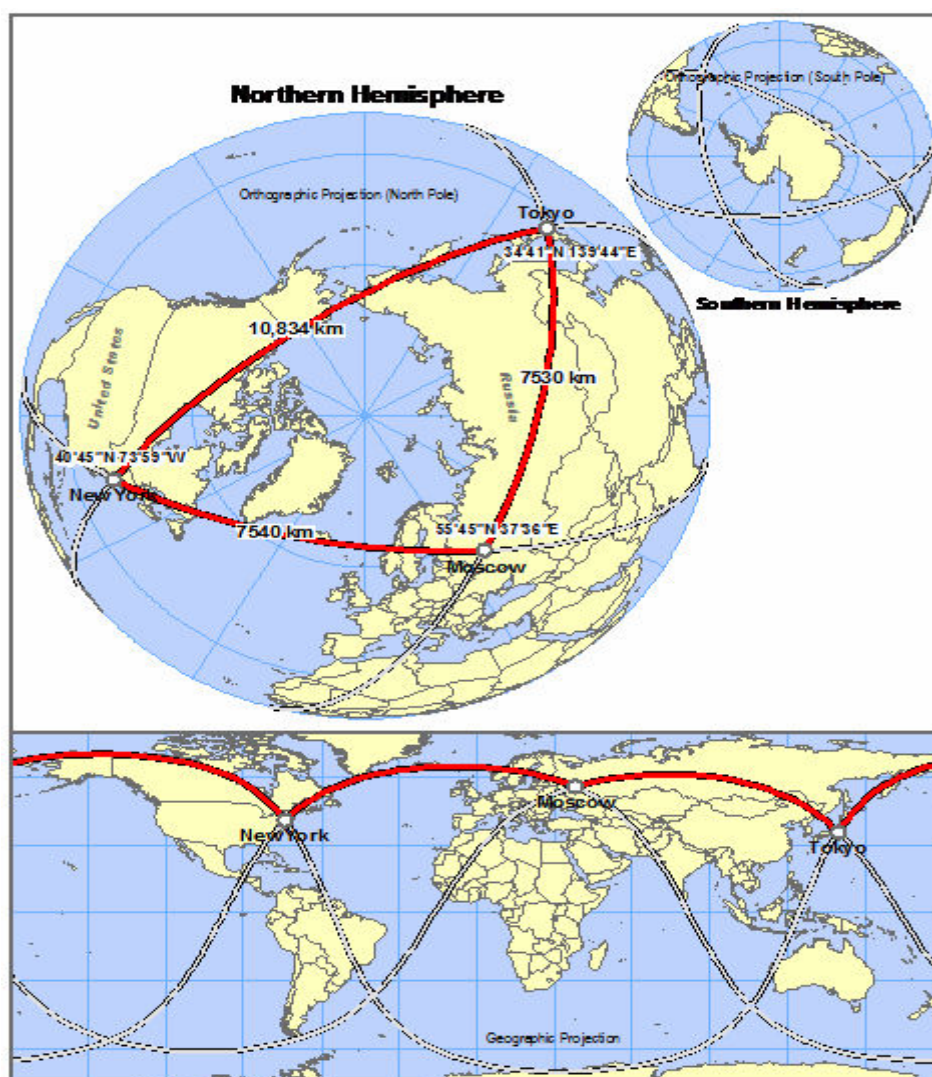


รูปภาพที่ ๑ - ๒๖ ภาพแสดงเส้นทางแพร่คลื่นฟ้าผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และย่านกระโดด

ระยะทางที่คลื่นฟ้าสามารถเดินทางไปได้ นั้น ขึ้นอยู่กับความสูงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เหนือพื้นโลกขณะนั้น ทั้งยังขึ้นกับเส้นทางของคลื่นหลายเส้นทางที่หักเหภายในชั้นบรรยากาศที่ความสูงต่าง ๆ กัน ในกรณีนี้ความถี่ใช้งานมีความสำคัญต่อความสามารถในการหักเหของคลื่น หากใช้ความถี่สูงเกินไปจะทำให้คลื่นทะลุออกนอกชั้นบรรยากาศ คลื่นที่หักเหลงมายังพื้นโลกครั้งแรกเรียกว่า Hop ที่หนึ่ง และหากคลื่นสามารถสะท้อนจากพื้นโลกกลับไปยังชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์อีกครั้งทำให้เกิด

การหักเหกลับลงมายังพื้นโลกอีกครั้งนั้น เรียกว่า Hop ที่สอง เป็นเช่นนี้เรื่อยไปทำให้คลื่นฟ้าสามารถเดินทางไปได้ระยะทางไกลมากขึ้น อย่างไรก็ตามพลังงานของคลื่นบางส่วนจะสูญเสียที่พื้นโลก ทำให้การติดต่อสื่อสารด้วยจำนวน Hop มาก เกิดการลดทอนของสัญญาณลง

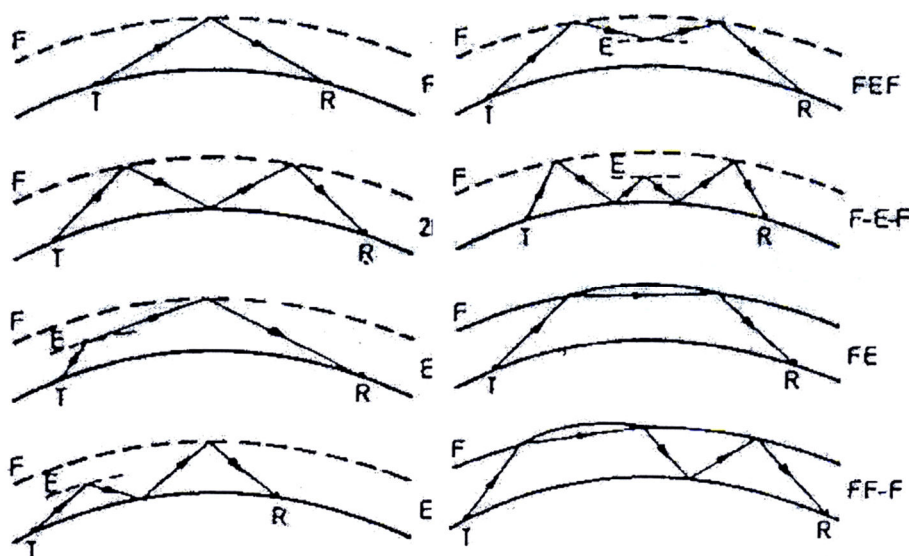
เส้นทางการแพร่กระจายคลื่นฟ้าระหว่างคู่รับส่งใด ๆ สามารถเขียนได้ตามเส้นทางวงรอบใหญ่ (Great - Circle path) ตามรูปภาพที่ ๑ - ๒๗ จากจุดส่งไปยังจุดรับตามระนาบภาคตัดขวางพาดผ่านจุดตกกระทบที่ชั้นบรรยากาศและจุดศูนย์กลางโลก ส่วนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ทำหน้าที่ควบคุมคลื่นฟ้าในกรณี Hop ที่หนึ่งของคลื่นฟ้าก็คือจุดตรงกลางระหว่างคู่รับส่งนั่นเอง อย่างไรก็ตามกรณีหลาย Hop การตกกระทบที่ชั้นบรรยากาศหลายจุดจะทำให้การสร้างเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นฟ้าทำได้ยากขึ้น เนื่องจากจะต้องคำนึงถึงสภาพชั้นบรรยากาศในแต่ละจุดด้วย เส้นทางการแพร่กระจายคลื่นฟ้าระหว่างคู่รับส่งใด ๆ จะมี ๒ เส้นทางเสมอ ได้แก่ เส้นทางหลัก หรือ “Short Path” (เส้นทางที่ใกล้ที่สุดจากจุดส่งไปยังจุดรับ) และเส้นทางรอง หรือ “Long Path” (เส้นทางยาวที่อ้อมไปอีกทางหนึ่ง)



รูปภาพที่ ๑ - ๒๗ ภาพแสดงของเส้นทางวงรอบใหญ่ (Great Circle Path)



ดังที่ได้กล่าวถึงชั้นบรรยากาศ E, F1 และ F2 มาแล้ว คลื่นวิทยุสามารถหักเหที่ชั้น E หรือ F ก็ได้ อย่างไรก็ตามคลื่นวิทยุอาจหักเหหรือสะท้อนลงมาจากสองชั้นหรือทั้งสามชั้นในการติดต่อครั้งเดียวกันก็ได้ ส่วนการสื่อสารด้วยคลื่นฟ้าระยะไกลสามารถกระทำได้โดยใช้คลื่น 1 Hop, 2 Hop หรือ 3 Hop ทั้งนี้ขึ้นกับระยะการติดต่อและสภาพชั้นบรรยากาศขณะนั้น รูปภาพที่ ๑.๒๘ แสดงภาพเส้นทางการเดินทางของคลื่นที่เป็นไปได้ การติดต่อแต่ละครั้งเกิดขึ้นอย่างน้อย ๒ เส้นทาง จะทำให้เกิดปัญหาจากการแพร่กระจายคลื่นหลายทาง หรือ “Multipath Effect” สัญญาณที่รับได้จะกระจายออกไป (dispersion) การเกิดของ Multipath Effect อาจเกิดได้จากหลายสาเหตุดังต่อไปนี้



รูปภาพที่ ๑ - ๒๘ ภาพแสดงโอกาสที่คลื่นวิทยุจะเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศไปได้

- Multihop : โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่สายอากาศรับและส่งที่มี Gain และมุมส่งออก (TOA : Take Off Angle) ต่ำ

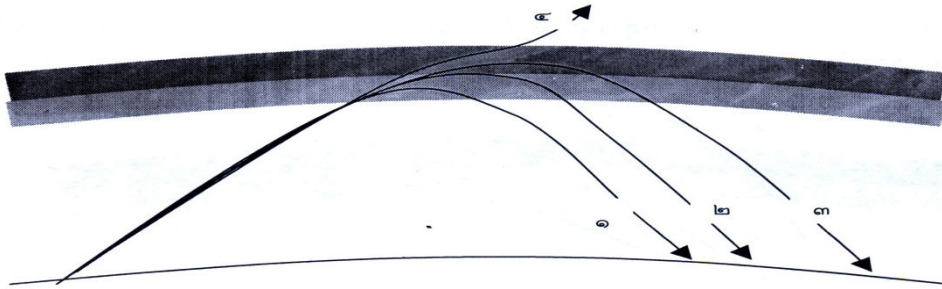
- การแพร่กระจายคลื่นที่มีทั้งมุม TOA สูงและต่ำในคราวเดียว
- การแพร่กระจายคลื่นกระทบชั้นบรรยากาศอย่างน้อย ๒ ชั้นขึ้นไป

โดยทั่วไประยะทางการเดินทางของคลื่นฟ้าใน 1 Hop จะเป็น ๒๐๐๐, ๓๔๐๐ และ ๔๐๐๐ กิโลเมตร สำหรับชั้น E, F1 และ F2 ตามลำดับ โดยที่ระยะทางนี้จะเปลี่ยนแปลงด้วยปัจจัยของความสูงชั้นบรรยากาศ และมุม TOA ของสายอากาศที่ต้องมี Gain สูง และมุม TOA ต่ำ

สำหรับการพิจารณาออกแบบระบบการติดต่อสื่อสารด้วยคลื่นฟ้าจะต้องพิจารณาถึงความถี่ใช้งาน, ระบบสายอากาศ, มุมส่งออก (TOA) และระยะทางในการติดต่อสื่อสาร (Circuit Length) เป็นองค์ประกอบสำคัญ ทั้งนี้เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบเหล่านี้จะมีผลทำให้เส้นทางการแพร่กระจายคลื่นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ดังตัวอย่างต่อไปนี้

กรณีมุมส่องออกหรือ TOA คงที่ (รูปภาพที่ ๑ - ๒๙)

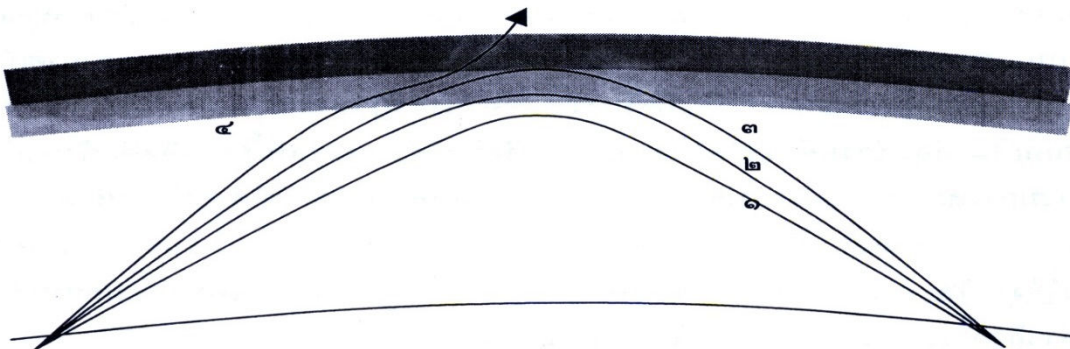
- ถ้าความถี่สูงขึ้น คลื่นจะหักเหจากชั้นบรรยากาศ ณ ระดับที่สูงขึ้น ทำให้ไปได้ระยะไกลขึ้น ตามเส้นทาง ๑ และ ๒
- ณ ความถี่สูงที่สุดที่สามารถหักเหจากชั้นบรรยากาศ คลื่นจะไปได้ระยะไกลมากที่สุด ตามเส้นทาง ๓
- ถ้าความถี่สูงกว่าความถี่สูงที่สุดที่สามารถหักเหจากชั้นบรรยากาศ คลื่นจะทะลุผ่านชั้นบรรยากาศนั้นไป ตามเส้นทาง ๔



รูปภาพที่ ๑ - ๒๙ กรณีมุม TOA คงที่ แสดงความสัมพันธ์ระยะทางกับความถี่ใช้งาน

กรณีระยะทางที่ต้องการติดต่อคงที่ (รูปภาพที่ ๑ - ๓๐)

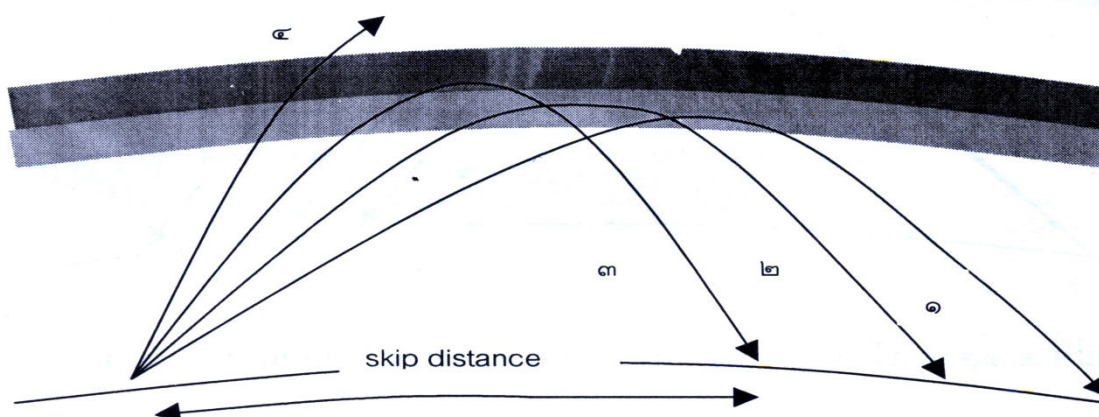
- ถ้าเพิ่มความถี่ให้สูงขึ้น คลื่นจะหักเหจากชั้นบรรยากาศ ณ ระดับที่สูงขึ้น เพื่อที่จะดำรงการติดต่อสื่อสารในระยะเดิมได้จะต้องเพิ่มมุม TOA ของสายอากาศ ตามเส้นทาง ๑ และ ๒
- ณ ความถี่สูงที่สุดที่สามารถหักเหจากชั้นบรรยากาศ มุม TOA ของสายอากาศจะสูงที่สุดในการดำรงการติดต่อสื่อสารในระยะเดิม ตามเส้นทาง ๓
- ถ้าความถี่สูงเกินกว่าความถี่สูงที่สุดที่คลื่นสามารถหักเหจากชั้นบรรยากาศได้ คลื่นจะทะลุผ่านชั้นบรรยากาศนั้นไป ตามเส้นทาง ๔



รูปภาพที่ ๑ - ๓๐ กรณีระยะทางคงที่ระหว่างจุดรับส่ง จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุม TOA กับความถี่ใช้งาน

### กรณีความถี่คงที่ (รูปภาพที่ ๑ - ๓๑)

- ถ้ามุม TOA ของสายอากาศต่ำ คลื่นจะไปได้ระยะไกล ตามเส้นทาง ๑
- ถ้ามุม TOA ของสายอากาศสูงขึ้น ระยะทางของคลื่นจะไปได้ลดลง คลื่นจะสะท้อนจากชั้นบรรยากาศ ณ ระดับที่สูงขึ้นตามเส้นทาง ๒ และ ๓
- ณ มุม TOA ของสายอากาศสูงที่สุดที่คลื่นสามารถหักเหกลับจากชั้นบรรยากาศ ระยะดังกล่าวเรียกว่า ระยะกระโดด (Skip Distance) ตามเส้นทาง ๓



รูปภาพที่ ๑ - ๓๑ กรณีความถี่คงที่ จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับมุมส่งออก

สรุป การติดต่อสื่อสารด้วยคลื่นตรงสามารถกระทำได้ง่ายที่สุด เนื่องจากการสื่อสารแบบแนวเส้นสายตา แต่หากคลื่นมาจากการสะท้อนกับสิ่งกีดขวาง หรือกระทบที่พื้นโลกจะทำให้คุณภาพของสัญญาณลดต่ำลง ส่วนในการติดต่อสื่อสารระยะไกลด้วยคลื่นฟ้าแต่ละครั้ง จะมีปัจจัยที่จะต้องคำนึงถึงหลายประการ ย่านกระโดด (Skip Zone) สามารถเปลี่ยนไปได้ตามความถี่ใช้งานขึ้นอยู่กับชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ขณะนั้น อย่างไรก็ตามแม้จะเลือกความถี่ที่เหมาะสมกับการติดต่อครั้งนั้นแล้วก็ตาม จะต้องเลือกสายอากาศที่มีมุมส่งออกอากาศ (TOA) ที่เหมาะสมด้วย เช่น ในการเลือกติดต่อด้วยสายอากาศแบบ Whip ที่ระยะทาง ๓๐๐ กม. ปรากฏว่าในย่านกระโดดไม่สามารถติดต่อได้ แต่เมื่อเปลี่ยนสายอากาศเป็นแบบไดโพล (Dipole) ซึ่งมีมุมส่งออกอากาศสูงกว่าในทิศทางที่ถูกต้องปรากฏว่าสามารถติดต่อได้เป็นต้น ส่วนการติดต่อด้วยคลื่นดินค่อนข้างมีข้อจำกัดในระยะทางที่ติดต่อได้ นอกจากนั้นการติดต่อด้วยคลื่นฟ้า ครั้งหนึ่ง ๆ อาจมีการสะท้อนหรือหักเหจากชั้นบรรยากาศได้หลายครั้งทำให้สายอากาศรับสามารถรับเอาคลื่นในหลายทาง (Multipath) เป็นสาเหตุให้คุณภาพของสัญญาณด้อยลงไป ดังนั้นการบริหารคลื่นความถี่วิทยุให้สามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพจึงต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจตลอดจนความชำนาญ

### ๑.๔.๔.๔ ผลกระทบเนื่องจากการรบกวนโดยคลื่นฟ้า

การสื่อสารในย่านความถี่ LF และ MF สายอากาศส่ง สามารถแพร่กระจายคลื่นได้ดีทั้งคลื่นดินและคลื่นฟ้า แต่โดยทั่วไปในเวลากลางวันพลังงานส่วนของคลื่นฟ้าจะถูกดูดซับโดยชั้น D ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ แต่เมื่อเวลากลางคืนความหนาแน่นของอิออนในชั้นนี้จะหมดไป ทำให้คลื่นฟ้าไม่ได้ถูกดูดซับออกไปในเวลากลางคืน สายอากาศด้านรับจึงมีโอกาสที่จะรับได้ทั้งส่วนของคลื่นดินและคลื่นฟ้าด้วย อย่างไรก็ตามคลื่นฟ้าจะเกิดระยะกระโดด (Skip Distance) ได้ในระยะหนึ่ง ซึ่งในช่วงระยะทางนี้สายอากาศรับจะรับได้เฉพาะส่วนของคลื่นดินเท่านั้น แต่การแพร่คลื่นในย่านความถี่ LF และ MF จะสามารถแพร่คลื่นดินได้ดีทำให้มีช่วงระยะหนึ่งที่สามารถรับได้ทั้งส่วนของคลื่นดินและคลื่นฟ้าทำให้เกิดการรบกวน การเกิดรบกวนกันเองนี้ทำให้คุณภาพของสัญญาณที่รับได้ไม่สามารถรับฟังได้เลย จนกว่าสัญญาณคลื่นฟ้าจะแรงกว่าคลื่นดินเมื่ออยู่ในระยะไกลออกไป

การสื่อสารในย่านความถี่ LF ใช้ในการสื่อสารด้วยคลื่นผิวพื้น (Surface Wave) ในระยะกลาง การใช้คลื่นโพลาริเซชันทางตั้งมีการสูญเสียน้อย สามารถเดินทางไปตามส่วนโค้งของโลกได้ในระยะหลายร้อยไมล์ ส่วนการสื่อสารในย่านความถี่ MF ใช้ในการกระจายเสียงด้วยระบบ AM ได้ในระยะกลางด้วยคลื่นดิน (Ground Wave) และใช้สำหรับการสื่อสารด้วยคลื่นผิวพื้น (Surface Wave) ระยะไกลเหนือพื้นน้ำทะเลได้ถึง ๑,๐๐๐ ไมล์ และสำหรับการสื่อสารในย่านความถี่ HF ซึ่งในย่านนี้ค่า Dielectric ของพื้นผิวเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการลดทอนสัญญาณสูงเมื่อใช้ความถี่สูงขึ้น จึงใช้สำหรับการสื่อสารในระยะไกล ส่วนการสื่อสารในย่านความถี่ VHF และสูงกว่าใช้สำหรับการสื่อสารแบบ Line-of-Sight ซึ่งเมื่อความถี่สูงขึ้น คลื่นตรงจะยังมีความสำคัญมากขึ้น และถือเป็นย่านที่ไม่ได้ใช้คลื่นดินในการสื่อสารแต่อย่างใด

## บทที่ ๒

### ทฤษฎีและหลักการทำงาน

แบบจำลองของการสื่อสารด้วยวิทยุอย่างง่ายสามารถแสดงได้ใน รูปภาพที่ ๒.๑ โดยมีองค์ประกอบที่ควรคำนึงถึง ได้แก่ เครื่องส่ง สายรับส่งสัญญาณ สายอากาศส่ง ตัวกลาง (ชั้นบรรยากาศโลก) สายอากาศรับ สายรับ-ส่งสัญญาณ และเครื่องรับ

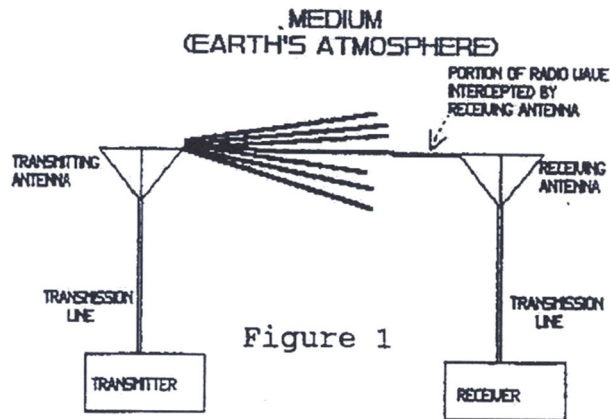


Figure 1

รูปภาพที่ ๒ - ๑ องค์ประกอบของการสื่อสารวิทยุอย่างง่าย

เครื่องส่งวิทยุ เป็นเครื่องกำเนิดคลื่นวิทยุ (RF: Radio Frequency) โดยที่เครื่องส่งวิทยุที่ใช้ในปัจจุบันมีหลายชนิดด้วยกัน โดยแต่ละชนิดจะทำการมอดูเลชันคลื่นต้นแบบแล้วจึงส่งออกอากาศไป เช่น เครื่องส่งประเภทส่งคลื่นต่อเนื่อง (CW : Continuous Wave) เครื่องส่งประเภทส่งคลื่นที่ทำการมอดูเลชันคลื่นต้นแบบด้วยการเปลี่ยนขนาด (AM : Amplitude Modulation) และ เครื่องส่งประเภทส่งคลื่นที่ทำการมอดูเลชันคลื่นต้นแบบด้วยการเปลี่ยนความถี่ (FM : Frequency Modulation) เป็นต้น

หากตั้งคำถามว่าทำไมต้องทำการมอดูเลชัน ทำไมไม่ส่งข่าวสารนั้นออกไปโดยตรง เหตุผลคือข่าวสารหรือสัญญาณต้นแบบมักมีความถี่ต่ำ (มีความยาวคลื่นมาก) ซึ่งโดยทั่วไปสายอากาศมักมีขนาดแปรผันตามครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ( $\lambda/2$ ) เช่น ความถี่เสียงส่วนมากมีความถี่ต่ำกว่า 3 kHz ( $\lambda/2 \approx 50$  กม.) ทำให้ต้องใช้สายอากาศที่มีความยาวมาก รวมทั้งต้องการเครื่องส่งที่มีกำลังส่งสูงมากจึงจะสามารถส่งคลื่นเสียงออกไปได้ในระยะทางที่ต้องการ ดังนั้นการแก้ปัญหาความยาวคลื่นมาก ๆ สามารถกระทำได้โดยทำการแปลงข่าวสารต้นแบบที่มีความถี่ต่ำไปสู่ย่านความถี่สูงกว่า จึงสามารถใช้สายอากาศที่มีขนาดเล็กลงได้ ซึ่งมีความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติมากกว่า

ในบทนี้จะกล่าวถึงพื้นฐานของการส่งคลื่น CW, การมอดูเลชันแบบ AM และ FM ตลอดจนองค์ประกอบของวงจรเครื่องส่งและเครื่องรับอย่างง่าย ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการปฏิบัติงานในการติดต่อสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุ รวมทั้งจะกล่าวถึงพื้นฐานในการคำนวณขนาดแบนด์วิธของทั้งระบบ AM, FM และจะกล่าวถึง

การคำนวณค่า SNR (Signal-to-Noise Ratio) นอกจากนั้นแล้วผู้อ่านยังสามารถทำความเข้าใจถึงความสำคัญของการเขียนสัญลักษณ์บ่งชี้ลักษณะการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งเรียกว่า Emission Designation

## ๒.๑ ระบบวิทยุ AM

### ๒.๑.๑ เครื่องส่ง CW (Continuous Wave Transmitter)

คลื่นต่อเนื่อง (CW) ใช้ในการสื่อสารด้วยวิทยุโทรเลข (Radio Telegraph) โดยจะทำการส่งพัลส์ของคลื่นวิทยุ (RF) ออกเป็นห้วงคลื่นสั้นยาวสลับกันไป (dot [•] หรือ dash [-] ในรหัสมอร์ส) เครื่องส่งแบบ CW ถือเป็นเครื่องส่งแบบแรกสำหรับการสื่อสารทางวิทยุ ข้อดีของ CW เมื่อเทียบกับระบบการส่งแบบอื่น คือ ใช้แบนด์วิดท์แคบ มีความเชื่อถือได้สูง ในสภาวะที่มีระดับสัญญาณรบกวนสูง สามารถติดต่อได้ในระยะไกล รูปภาพที่ ๒ - ๒ แสดงส่วนประกอบสำคัญของเครื่องส่ง CW ได้แก่ ออสซิลเลเตอร์ (Oscillator), วงจรขยายสัญญาณบัฟเฟอร์ (Buffer Amplifier), วงจรสลับสัญญาณเปิดปิด, วงจรขยายก่อนออกอากาศ (PA : Power Amplifier), สายอากาศ และเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า (Power Supply)

ออสซิลเลเตอร์ ทำหน้าที่ผลิตสัญญาณคลื่นพาห์ (RF Carrier) ตามความถี่ที่กำหนด ด้วยขนาดที่คงที่ คุณสมบัติที่สำคัญของออสซิลเลเตอร์ก็คือ ความมีเสถียรภาพที่ต้องผลิตความถี่ที่คงที่ (Frequency Stability) และมีขนาดที่คงที่เสมอ (Amplitude Stability)

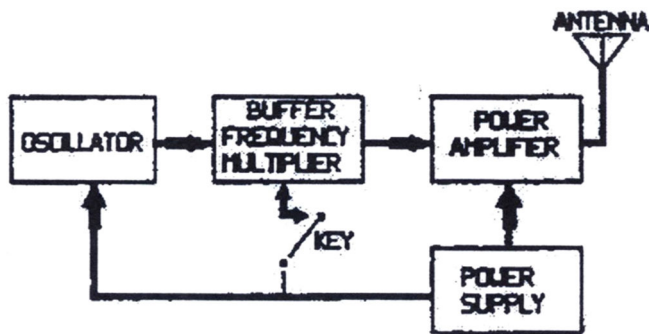
บัฟเฟอร์ ทำหน้าที่แยกสัญญาณไฟฟ้าระหว่างออสซิลเลเตอร์ เพื่อป้องกันการทำงานเกินขนาดของออสซิลเลเตอร์ หากไม่มีบัฟเฟอร์ การกดคีย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณไฟฟ้า จะมีผลต่อโหลด (Load) ของออสซิลเลเตอร์ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ความถี่ที่ผลิตโดยออสซิลเลเตอร์เปลี่ยนไปได้ ส่วนวงจร Frequency Multiplier จะทำหน้าที่ทวีคูณความถี่ให้สูงขึ้นตามความต้องการก่อนส่งออกอากาศ

วงจรสลับสัญญาณเปิดปิดที่เรียกว่า คีย์ (Key) จะทำหน้าที่ตัดต่อสัญญาณในบัฟเฟอร์ เมื่อคีย์ปิดคลื่นพาห์ (RF carrier) จะผ่านออกจากวงจรบัฟเฟอร์ไปยัง PA (หรือ dot •) และเมื่อคีย์เปิดคลื่นพาห์ RF ถูกกั้นไม่ให้ผ่านออกไป (หรือ dash -)

ภาคขยายกำลัง (PA : Power Amplifier) ทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ผลิตออกมาจากออสซิลเลเตอร์ให้มีขนาดสูงขึ้นเพียงพอก่อนการออกอากาศ นอกจากนั้นในเครื่องส่งบางแบบสามารถเพิ่มวงจรขยายสัญญาณเข้าอยู่ระหว่างบัฟเฟอร์และภาค PA มากกว่า ๑ วงจรได้ วงจรขยายนี้เรียกว่า วงจรขยายชั้นกลาง (IPA : Intermediate Power Amplifier)

สายอากาศ (Antenna) ทำหน้าที่รับพลังงานไฟฟ้าจากภาคขยายกำลังและเปลี่ยนให้เป็นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าก่อนแพร่กระจายคลื่นออกอากาศต่อไป

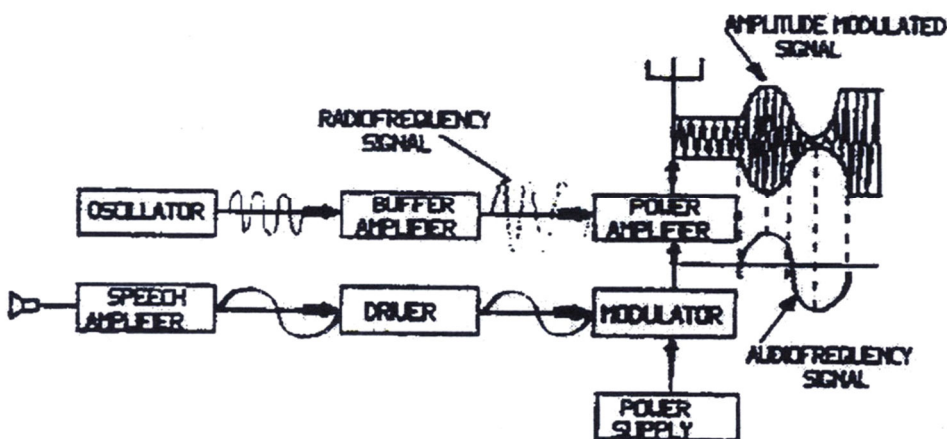
เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า (Power supply) ทำหน้าที่จ่ายไฟไปยังวงจรไฟฟ้าต่าง ๆ ในอุปกรณ์



รูปภาพที่ ๒ - ๒ เครื่องส่งแบบ CW

๒.๑.๒ เครื่องส่งแบบ AM

คลื่นพาห์ (Carrier) เป็นสัญญาณต้นแบบที่ผลิตขึ้นโดยวงจรออสซิลเลเตอร์ในเครื่องส่ง คลื่นพาห์จะมีความถี่และขนาดคงที่ ทำหน้าที่ถ่ายทอดพลังงานคลื่นไปสู่ตัวกลาง ซึ่งข่าวสารที่ต้องการส่งออกไปจะถูกเพิ่มหรือผสมเข้าไปบนคลื่นพาห์นี้ เรียกว่า การผสมคลื่น (Modulation)

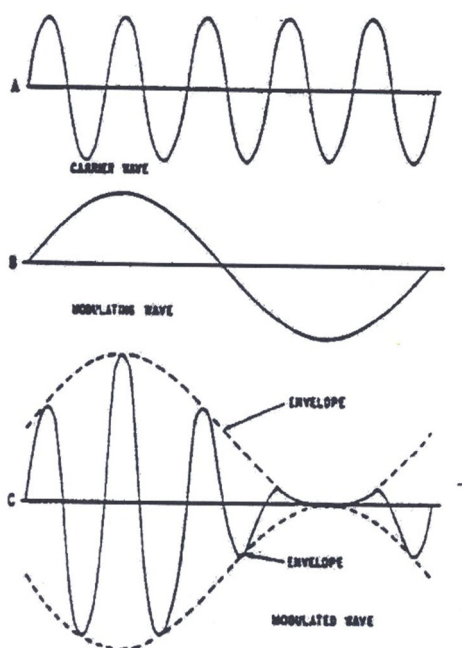


รูปภาพที่ ๒ - ๓ ภาพแสดงส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องส่งแบบ AM

รูปภาพที่ ๒ - ๓ แสดงส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่องส่งแบบ AM ซึ่งแสดงให้เห็นว่า คลื่น AM ที่ผ่านการมอดูเลตที่ PA แล้ว จะถูกบังคับให้มีรูปร่างเป็นไปตามขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปของกระแส/แรงดันของคลื่นที่จะทำการมอดูเลชัน (Modulating Signal) หรือเรียกว่าสัญญาณต้นแบบ (Baseband) เมื่อคลื่นต้นแบบที่เป็นข่าวสารถูกผสมเข้าไปในคลื่นพาห์ จะทำให้เกิดรูปแบบคลื่นที่มีความซับซ้อนขึ้น โดยรูปคลื่นจะมีจุดสูงต่ำเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราการเปลี่ยนของคลื่นต้นแบบ และคลื่นซับซ้อนนี้เองที่เป็นคลื่น AM ที่จะส่งออกอากาศต่อไป นอกจากที่กล่าวมาแล้ว รูปที่ ๒.๓ ยังแสดงส่วนประกอบที่สำคัญอื่น ๆ ได้แก่ ไมโครโฟน (Microphone), ภาควิทยาสัญญาณเสียง (Amplification stage), ภาควัดขับ (Driver Stage) และภาคผสมคลื่น (Modulator Stage) โดยที่ไมโครโฟนจะเป็นตัวแปลงสัญญาณเสียงเป็นพลังงานไฟฟ้าทำงานด้วยแผ่นบาง ๆ ที่เรียกว่า “ไดอะแฟรม” ที่มีการขยับเข้า-ออกตามจังหวะของเสียงพูด ในขณะที่

วงจรขยายสัญญาณเสียง (Speech Amplifier) ทำหน้าที่รับสัญญาณที่มาจากไมโครโฟน โดยทั่วไปมีขนาดน้อยกว่า 1 Volt แล้วทำการขยายโดยภาคไดร์เวอร์ ส่วนภาคมอดูเลเตอร์เป็นส่วนที่เชื่อมต่อโดยตรงกับภาคขยาย (PA) ซึ่ง PA จะทำหน้าที่รับสัญญาณมาจากมอดูเลเตอร์และ Buffer Amplifier แล้วทำการเพิ่มสัญญาณทั้งด้านบวกและลบให้ขนาดคลื่นพาร์เป็นไปตามอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดของคลื่นต้นแบบ

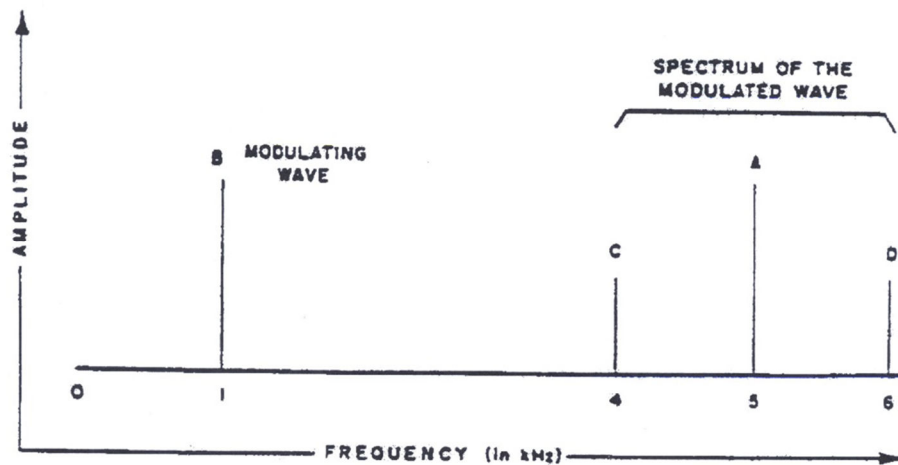
รูปภาพที่ ๒ - ๔ แสดงภาพคลื่นพาร์ (A), คลื่นต้นแบบ (B) ก่อนที่จะทำการมอดูเลตและคลื่น AM ที่ทำการมอดูเลตเรียบร้อยแล้ว (C) และถูกบรรจุอยู่ในกรอบของคลื่นต้นแบบที่เรียกว่า เอนVELOPE (Envelope)



รูปภาพที่ ๒ - ๔ ภาพแสดงการมอดูเลตคลื่นต้นแบบให้เป็นคลื่น AM

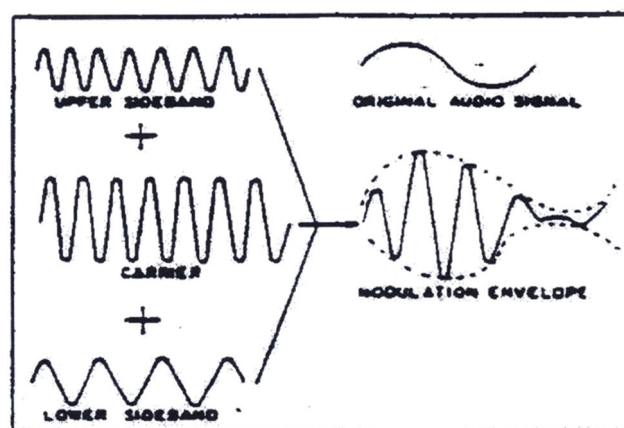
รูปภาพที่ ๒ - ๕ แสดงภาพแถบความถี่และแบนด์วิดท์ของคลื่น AM โดยในตัวอย่างใช้คลื่นต้นแบบเสียงความถี่เดียว มีความถี่  $f_0$  (B) แสดงภาพด้วยเส้นความถี่ (Line Spectrum) ซึ่งเมื่อผ่านกระบวนการมอดูเลชันแล้ว คลื่น AM ที่ได้จะมีเส้นความถี่ ๓ เส้นความถี่ (A,C,D) โดยเส้นความถี่ A เป็นเส้นความถี่ของคลื่นพาร์ ส่วนเส้นความถี่ D เรียกว่า ความถี่แถบด้านบน (Upper Sideband : USB) มีความถี่เท่ากับความถี่ของคลื่นพาร์ ( $f_c$ ) บวกกับความถี่เสียง ( $f_{USB} = f_c + f_0$ ) สุดท้ายคือ เส้นความถี่ C เรียกว่า ความถี่แถบด้านล่าง (Lower Sideband : LSB) มีความถี่เท่ากับความถี่ของคลื่นพาร์ ลบด้วยความถี่เสียง ( $f_{LSB} = f_c - f_0$ ) ตัวอย่างของเส้นแถบสเปกตรัมของคลื่น AM ที่แสดงในรูปภาพที่ ๒.๕ ความถี่พาร์ (A) คือ ๕ kHz และสัญญาณความถี่ที่ถูกมอดูเลต (B) คือ 1 kHz ดังนั้น ความถี่แถบด้านล่าง (C) คือ  $5 \text{ kHz} - 1 \text{ kHz} = 4 \text{ kHz}$  และความถี่แถบด้านบน (D) คือ  $5 \text{ kHz} + 1 \text{ kHz} = 6 \text{ kHz}$





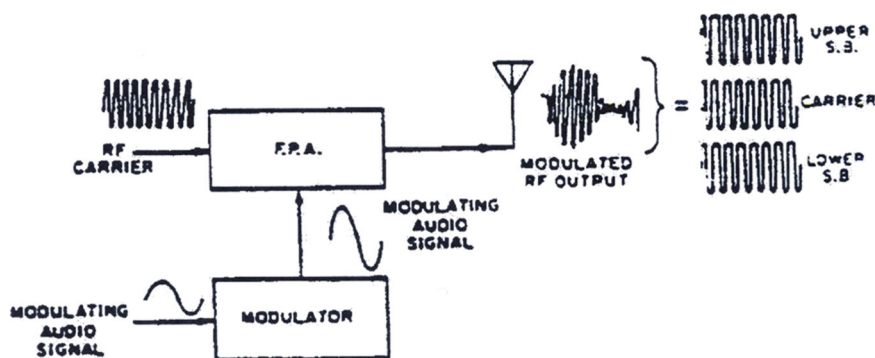
รูปภาพที่ ๒ - ๕ ภาพแสดงเส้นความถี่ของคลื่นต้นแบบและคลื่น AM

ในทางปฏิบัติคลื่นต้นแบบประกอบไปด้วยหลาย ๆ ความถี่ ที่ถูกระจุกตัวประกอบกันเป็นแถบพลังงานที่เรียกว่า สเปกตรัม (Spectrum) เมื่อถูกมอดูเลตแล้ว พลังงานของคลื่นต้นแบบจะถูกแบ่งออกเป็นแบนด์ทางข้างสองแบนด์เท่า ๆ กัน แต่รูปร่างของสเปกตรัมยังเหมือนเดิมเช่นเดียวกับ line spectrum ตามตัวอย่างในรูปภาพที่ ๒ - ๕ พลังงานของคลื่นต้นแบบจะเพิ่มเข้าไปในพลังงานของคลื่นพาห้ จึงเป็นการเพิ่มพลังงานออกอากาศของคลื่น AM ช่วงของความถี่ที่มีขนาดครอบคลุมสเปกตรัมของคลื่นพาห้รวมกับแบนด์ด้านข้างทั้งสองแบนด์ รวมเรียกว่า แบนด์วิดท์ (Bandwidth) โดยที่แบนด์ด้านข้างทั้งสองจะบรรจุข้อมูลเหมือนกันทุกประการ ซึ่งหากคลื่นต้นแบบและคลื่นพาห้มีขนาดคงที่แล้ว แบนด์ด้านข้างซึ่งเกิดจากผลรวมและผลต่างของความถี่  $f_c$  และ  $f_o$  จะมีขนาดคงที่เช่นกัน เมื่อใช้ Oscilloscope จับดูจะเห็นรูปคลื่นเป็นดังรูปภาพที่ ๒ - ๖



รูปภาพที่ ๒ - ๖ ภาพแสดงการมอดูเลชันแบบ AM ซึ่งยังคงรูปร่างของ Envelope เดิมของสัญญาณต้นแบบหลังการมอดูเลชันแล้ว

ในทางกลับกันหากคลื่นต้นแบบมีขนาดและความถี่เปลี่ยนแปลง จะส่งผลให้ขนาดและความถี่ของแต่ละแบนด์ด้านข้างของคลื่น AM เปลี่ยนไปในลักษณะที่สัมพันธ์ซึ่งกันและกัน ตัวอย่างเช่น ในการส่งสัญญาณเสียง ความถี่และขนาดของคลื่นต้นแบบเปลี่ยนไปตามการพูดของพนักงานวิทยุ ผลลัพธ์ของคลื่น AM จึงมีการเปลี่ยนแปลงในแบนด์ด้านข้างอย่างต่อเนื่องในความถี่แถบข้าง รูปภาพที่ ๒ - ๗ แสดงเอาต์พุตของเครื่องส่งระบบ AM ที่มอดูเลตกับสัญญาณเสียงที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดขึ้นลง เมื่อมีการบวกขนาดของคลื่นเสียงกับคลื่นพาห้ ทำให้ envelope ของคลื่น AM จึงเปลี่ยนไปตามขนาดของคลื่นเสียงนั่นเอง



รูปภาพที่ ๒ - ๗ ภาพแสดงการมอดูเลชั่นของเครื่องส่ง AM

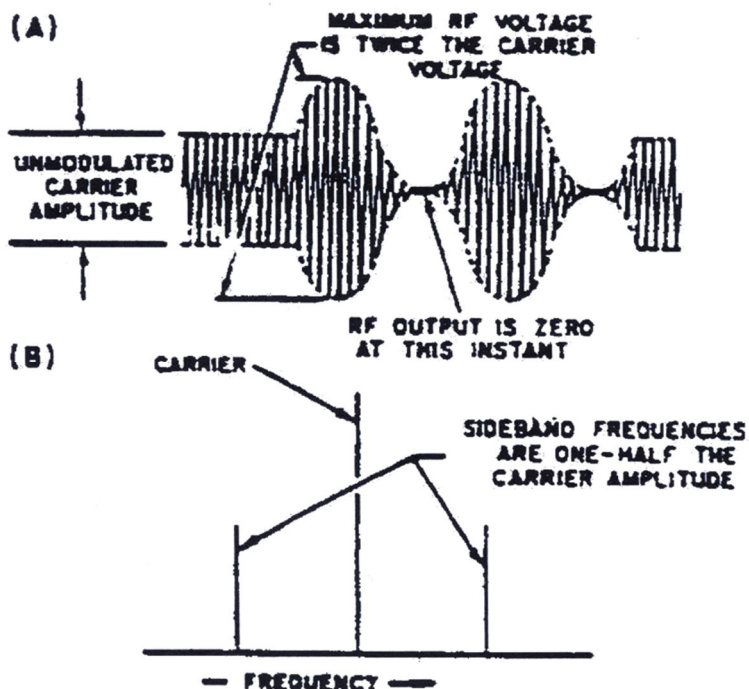
## เปอร์เซ็นต์ของการมอดูเลชั่น (Percent of Modulation)

อัตราการมอดูเลชั่นของคลื่น AM จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับเป็นเปอร์เซ็นต์ของการมอดูเลชั่น โดยเปอร์เซ็นต์การมอดูเลชั่นขึ้นอยู่กับความแรงของสัญญาณต้นแบบ เราจึงสามารถควบคุมค่าสูงสุดในการมอดูเลชั่นได้ ในรูปภาพที่ ๒ - ๘ แสดงถึงภาวะการมอดูเลต ๑๐๐% ซึ่งเมื่อดูขนาดของเอนเวโลปจะเห็นว่าจุดต่ำสุดของพลังงานออกอากาศ (RF Output) จะเท่ากับศูนย์ (ดูรูป A) และเมื่อดูสเปกตรัมของคลื่น AM ในรูป B จะพบว่าประกอบด้วยเส้นความถี่ (Line Spectrum) ของคลื่นพาห้และแบนด์ด้านข้างทั้ง USB และ LSB ซึ่งถูกแบ่งพลังงานเป็นสองส่วนเท่า ๆ กัน โดยแต่ละข้างมีขนาดเท่ากับครึ่งหนึ่งของขนาดของคลื่นพาห้ (เฉพาะที่เปอร์เซ็นต์การมอดูเลต ๑๐๐%)

การทำการมอดูเลชั่นที่ ๑๐๐% จะสามารถส่งพลังงานออกอากาศได้มากที่สุดไปในแบนด์ด้านข้างแต่ละแบนด์ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติเมื่อส่งข่าวโดย Voice จะพบว่าหากปรับแต่งให้ดีแล้วการมอดูเลชั่นที่ ๑๐๐% จะเกิดเฉพาะเมื่อเสียงของพนักงานเปล่งออกมาดังที่สุดเท่านั้น (โดยเฉพาะกรณีที่คลื่นเสียงแกว่งลงเร็วและแรงที่สุด) แต่การเปล่งเสียงปกติการมอดูเลชั่นจะทำได้ในอัตราที่น้อยกว่า ๑๐๐% เสมอ

ประสิทธิภาพของเครื่องส่งระบบ AM แบบ Double Sideband (DSB) ขึ้นกับพลังงานออกอากาศใน LSB และ USB ซึ่งตามปกติแล้วจะคิดตามพลังงานของคลื่นพาห้ที่ส่งไปถึงสายอากาศเป็นหลัก (พลังงานของคลื่นพาห้เมื่อยังไม่มอดูเลต หรือ Unmodulated Carrier Power) กล่าวคือ การมอดูเลชั่นที่ ๑๐๐% จะมีพลังงานออกอากาศของแบนด์ด้านข้างรวมกันเป็นครึ่งหนึ่งของพลังงานคลื่นพาห้ แต่หากลดเปอร์เซ็นต์ของการ

มอดูเลชันเหลือเพียงครึ่งหนึ่งจากข้างต้น พลังงานของแบนด์ด้านข้างจะลดลงเหลือหนึ่งในสี่ของการมอดูเลตที่ ๑๐๐% เท่านั้น



รูปภาพที่ ๒ - ๘ ภาพแสดงการมอดูเลชันที่ ๑๐๐% ซึ่งทำให้ USB และ LSB ออกอากาศด้วยพลังงาน

### ๒.๑.๓ เครื่องรับวิทยุแบบ AM

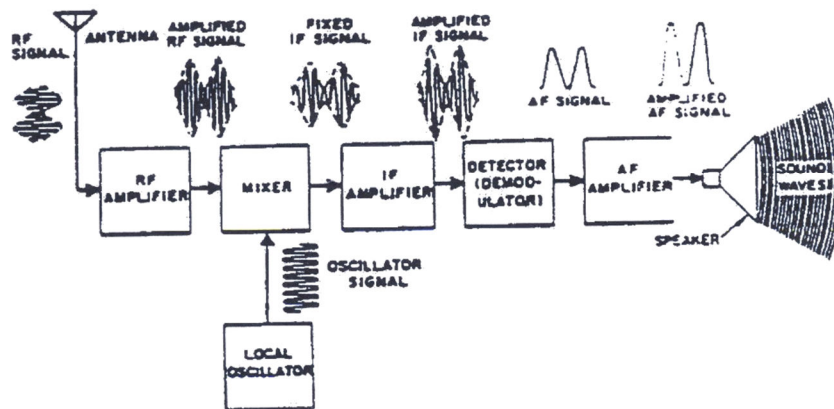
เครื่องรับวิทยุ ทำหน้าที่ดักจับคลื่นสัญญาณวิทยุจากสายอากาศ (Reception) โดยใช้สายอากาศทำหน้าที่แปลงพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่รับได้จากในตัวกลาง (อากาศ) ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการสื่อสารนั้น ๆ และเลือกรับเฉพาะความถี่ที่ต้องการ (Selection) จากนั้นจึงทำการแยกสัญญาณ (Detection) โดยแยกความถี่เสียงออกจากคลื่นพาห้ แล้วขยายสัญญาณเสียงให้ได้ระดับที่ต้องการ (Audio Frequency Amplification) และสร้างสัญญาณเสียงขึ้นใหม่อีกครั้ง (Reproduction) คุณสมบัติพื้นฐานของเครื่องรับที่ดีมี ๒ ประการคือ

- ความไว (Sensitivity) ได้แก่ คุณสมบัติของเครื่องรับที่สามารถสร้างสัญญาณข่าวสารจากเครื่องส่งกลับมาใหม่ได้ แม้ในสถานะสัญญาณที่รับได้อ่อนมาก
- ความสามารถในการเลือกรับสัญญาณที่ต้องการ (Selectivity) ได้แก่ คุณสมบัติของเครื่องรับที่สามารถรับเอาเฉพาะสัญญาณในความถี่ที่ต้องการได้ แม้กระทั่งอยู่ในสถานะแวดล้อมที่มีการรบกวนจากความถี่อื่นได้

## ๒.๑.๔ เครื่องรับซูเปอร์เฮเทอโรไดน์ (Superheterodyne Receiver)

“เฮเทอโรไดน์” มีความหมายว่า หลักการหรือกรรมวิธีของการรวมกันของความถี่สองความถี่หรือมากกว่า ทำให้เกิดความถี่ใหม่ขึ้นมา ด้วยหลักการนี้เครื่องรับแบบซูเปอร์เฮเทอโรไดน์ จึงจะทำการเปลี่ยนสัญญาณความถี่ทั้งหมดที่รับเข้ามาให้เป็นสัญญาณที่มีความถี่คงที่ค่าหนึ่ง เรียกว่า ความถี่กลาง หรือ IF (Intermediate Frequency) การใช้ความถี่ IF มีข้อดีอย่างหนึ่ง คือ วงจร IF สามารถเลือกใช้ด้วยแบบที่เป็นมาตรฐาน มีการเลือกรูปแบบที่มีอัตราการขยายสูงและแถบความกว้างที่เหมาะสมสำหรับระบบวิทยุแบบต่าง ๆ

รูปภาพที่ ๒ - ๙ แสดงภาพการทำงานของเครื่องรับแบบซูเปอร์เฮเทอโรไดน์ เมื่อสายอากาศรับคลื่นพลังงาน RF แล้ว จะส่งผ่านสัญญาณเข้ามายังวงจรขยายสัญญาณภาค RF สัญญาณ RF ที่ถูกขยายขนาด จะเข้าไปผสมกับสัญญาณ RF ที่ผลิตขึ้นจาก local oscillator ซึ่งมีขนาดคงที่ การผสมคลื่นในภาคมิกเซอร์ (Mixer Stage) จะได้ผลลัพธ์เป็นสัญญาณความถี่กลาง (IF) จากนั้นสัญญาณจะถูกขยายจากภาคขยายสัญญาณ IF อีกหลายครั้ง แล้วจึงถูกป้อน (feed) เข้าสู่ภาคดีเทคเตอร์ (Detector) เพื่อแยกสัญญาณเสียงต้นแบบ ออกจากสัญญาณ IF จากนั้นจึงจะส่งต่อไปยังภาคขยายสัญญาณความถี่เสียง (Audio Frequency : AF) ก่อนออกสู่ลำโพงต่อไป ซึ่งมีรายละเอียดในขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้



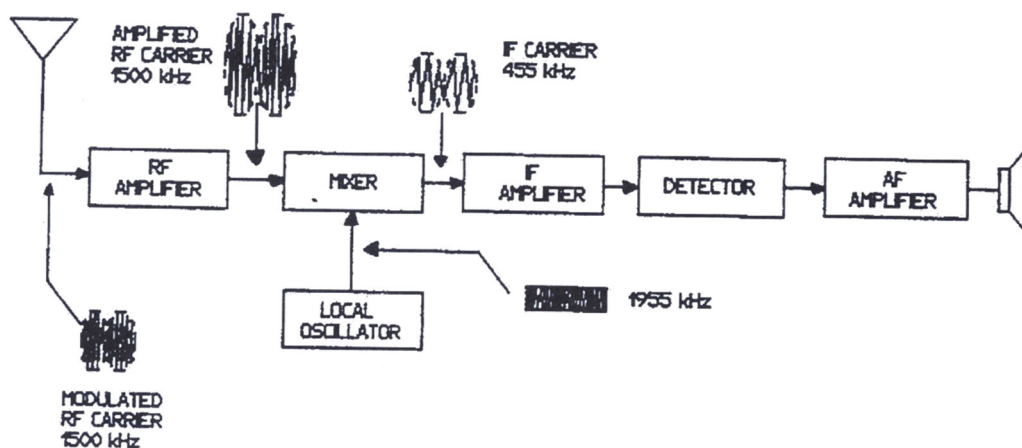
รูปภาพที่ ๒ - ๙ แผนภาพการทำงานของเครื่องรับซูเปอร์เฮเทอโรไดน์

- สายอากาศ เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางจากสายอากาศส่งผ่านตัวกลางเข้าสู่สายอากาศรับ และเหนี่ยวนำทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กในสายอากาศรับ สัญญาณที่เกิดจากพลังงานไฟฟ้านี้ จะถูกป้อนเข้าสู่วงจรเลือกความถี่จากสายอากาศ (Frequency Selection Circuit) ที่อยู่ทางเข้าของเครื่องรับ ซึ่งทำหน้าที่เลือกรับสัญญาณเฉพาะความถี่ที่ต้องการเท่านั้นเพื่อส่งต่อไปยังภาคขยายสัญญาณ RF ต่อไป

- ภาคขยายสัญญาณ RF ทำหน้าที่ขยายสัญญาณจากวงจรเลือกความถี่ นอกจากขยายสัญญาณ RF แล้ว ยังทำหน้าที่เป็นตัวแยกวงจร Local Oscillator ออกจากระบบกราวด์ (Ground

System) ของสายอากาศอีกด้วย มิเช่นนั้นแล้วหากสายอากาศต่อตรงกับภาคมิกเซอร์วงจร Local Oscillator อาจสูญเสียพลังงานบางส่วนออกอากาศไปได้ นอกจากนั้นแล้วภาคขยาย RF ยังทำหน้าที่ปรับระดับ SNR ของเครื่องรับให้ดีขึ้น ดังนั้นภาคขยาย RF ที่ดีต้องสามารถรับเอาสัญญาณที่ต้องการได้แรงกว่าสัญญาณรบกวน (Noise) ซึ่งเป็นค่าประจำของเครื่องรับแม้จะเป็นสัญญาณที่อ่อนมากก็ตาม (สัญญาณรบกวนค่าประจำของเครื่องรับเป็นผลจากการทำงานของหลาย ๆ วงจรภายในแต่ละภาคของเครื่องรับ) ทั้งนี้ภาคมิกเซอร์เป็นภาคที่ผลิตสัญญาณรบกวนมากที่สุดของเครื่องรับ ดังนั้นภาคขยาย RF จะต้องขยายสัญญาณให้มีขนาดเพียงพอสำหรับภาคมิกเซอร์ หากพิจารณาถึงคุณสมบัติพื้นฐานของภาครับ คือ Selectivity และ Sensitivity ตามที่กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว ภาคขยาย RF นี้จึงทำหน้าที่แสดงคุณสมบัติ Selectivity ในการเลือกรับเฉพาะความถี่ที่ต้องการ และกำจัดสัญญาณที่ไม่ต้องการออกไป รวมทั้งคุณสมบัติ Sensitivity ในการขยายสัญญาณ RF ขึ้นมาเพื่อส่งต่อให้ภาคมิกเซอร์ได้ ดังนั้นค่าความไว (Sensitivity) ของเครื่องวิทยุจึงสามารถปรับปรุงได้โดยเพิ่มอัตราการขยายของภาคขยาย RF หรือ การเพิ่มจำนวนภาค (Stage) ของการขยายในภาคขยาย RF นี้เอง

- ภาคมิกเซอร์ (Mixer Stage) มีหน้าที่แปลงความถี่โดยใช้ขบวนการเฮเทอโรไดน์ โดยนำสัญญาณ RF ที่มาจากภาคขยาย RF และสัญญาณที่ผลิตขึ้นจาก Local Oscillator มาผสมกันทำให้ได้คลื่นความถี่เกิดขึ้นมาใหม่หลายความถี่ เช่น ความถี่จาก RF Amplifier, ความถี่จากชุด Local Oscillator, ความถี่ที่เป็นผลบวกและผลลบของความถี่ทั้งสอง รวมทั้งความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่าง ๆ ความถี่ที่เกิดจากผลบวกและผลบวกนี้จะถูกเลือกไปใช้งานเป็นความถี่ IF แต่โดยส่วนมากแล้วจะนำเอาค่าความถี่ที่เป็นผลลบไปใช้งานเป็นความถี่กลาง (IF) ของเครื่องรับนั่นเอง ส่วนผลบวกไม่นิยมนำไปใช้งาน



รูปภาพที่ ๒ - ๑๐ ตัวอย่างการสร้างความถี่ IF ของภาคมิกเซอร์ในเครื่องรับซูเปอร์เฮเทอโรไดน์

ในเครื่องรับซูเปอร์เฮเทอโรไดน์ ส่วนมากความถี่ IF จะมีค่า 455 kHz สัญญาณ IF จะทำหน้าที่เป็นคลื่นพาห้ที่มีความถี่ 455 kHz นั่นเอง ในตัวอย่างรูปภาพที่ ๒ - ๑๐ แสดงการทำงานของภาคเครื่องรับที่รับความถี่ (คลื่นพาห้) 1,500 kHz ในส่วนของภาค Local Oscillator จะผลิตสัญญาณความถี่ 1,955 kHz ส่งให้ภาคมิกเซอร์เพื่อผสมกับสัญญาณ 1,500 kHz ทำให้ได้ความถี่ผลลบเท่ากับ  $1,955 - 1,500 = 455$  kHz เป็นความถี่กลางมาใช้งาน

- วงจรขยายความถี่ IF ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ IF เพื่อเพิ่มคุณสมบัติ Selectivity ของเครื่องรับ ส่วนความถี่อื่นใดนอกเหนือจากความถี่ IF จะไม่ถูกขยาย จากนั้นสัญญาณจึงถูกป้อนเข้าสู่ภาคดีเทคเตอร์ต่อไป

- วงจรดีเทคเตอร์ (Detector) คือ กรรมวิธีของการแยกรับเอาสัญญาณต้นแบบที่เป็นข่าวสาร (เสียง) โดยทำการดักจับจากเอนVELOPE ของคลื่น AM ที่ถูกมอดูเลตด้วยความถี่ IF เมื่อได้สัญญาณต้นแบบที่มีความถี่เสียง (AF) ก็จะส่งต่อไปให้กับภาคขยาย AF ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ AF ที่ถูกป้อนมาจากภาคดีเทคเตอร์ แล้วจึงส่งต่อเข้าสู่ลำโพงต่อไป

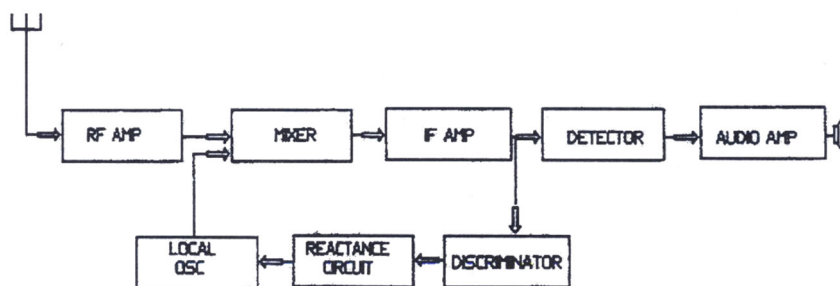
## วงจรควบคุมเครื่องรับ (Receiver Control Circuit)

- วงจรควบคุมระดับสัญญาณอัตโนมัติ หรือ AGC (Automatic Gain Control) เสียงที่ได้ยินจากลำโพงในเครื่องรับวิทยุอาจมีการเปลี่ยนระดับความดัง-ค่อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการรับสัญญาณความถี่จากสถานีส่งต่างกัน หรือเป็นผลมาจากการจางหาย (Fading) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของสภาวะชั้นบรรยากาศ หรือการสะท้อนของคลื่นจากสิ่งกีดขวาง จึงทำให้สัญญาณที่แม้ว่าจะส่งออกจากสถานีส่ง ๒ แห่งที่อยู่ห่างออกไปในระยะทางเท่า ๆ กันจากเครื่องรับก็อาจเกิดภาวะการจางหายมากน้อยต่างกันได้ วงจร AGC จะทำหน้าที่เป็นวงจรควบคุมการจำกัดช่วงของการเปลี่ยนแปลงขนาดสัญญาณไว้มิให้มากหรือน้อยเกินไป ซึ่งวงจร AGC โดยทั่วไปมีข้อเสีย คือ จะมีการลดทอนสัญญาณ RF ที่รับได้มีระดับสัญญาณต่ำมาก แต่สามารถแก้ไขได้โดยการใช้วงจร AGC แบบหน่วงเวลา (Delayed AGC) วงจรนี้จะหยุดการนำสัญญาณย้อนกลับเข้าวงจรเมื่อสัญญาณเข้ามีระดับต่ำเกินไป โดยในสภาวะปกติจะทำงานเช่นเดียวกับวงจร AGC แบบธรรมดา

- วงจร Beat-Frequency Oscillator (BFO) มีความจำเป็นต่อการใช้งานเมื่อรับสัญญาณ แบบ CW ทั้งนี้เนื่องจากสัญญาณ CW ไม่ได้ถูกมอดูเลตด้วยสัญญาณต้นแบบที่เป็นสัญญาณเสียง แต่การทำงานของเครื่องรับจะทำงานเช่นเดียวกับการรับสัญญาณ AM SSB กล่าวคือ สัญญาณ CW จะผ่านกรรมวิธีของภาคขยาย RF, มิกเซอร์, Local Oscillator และภาคขยาย IF เช่นเดียวกับคลื่น AM SSB แต่เนื่องจากสัญญาณ CW ที่เข้ามาชุดดีเทคเตอร์ เป็นสัญญาณที่มีความถี่เดียวไม่มีแบนด์ด้านข้าง เพื่อที่จะสร้างสัญญาณออกลำโพงเป็นเสียง (AF) สัญญาณ CW จึงยังคงต้องผ่านกรรมวิธีเฮเทอโรไดน์ด้วยการผสมกับความถี่ RF ที่มาจาก Local Oscillator ผลลัพธ์ที่เป็นผลลบของความถี่ทั้งสอง โดยปกติในการรับคลื่น AM SSB จะเท่ากับความถี่ IF แต่ในการรับคลื่น CW ความถี่จะถูกจับไปต่างจากความถี่  $IF = \pm 1 \text{ kHz}$  เพื่อให้สามารถได้ยินเสียง CW ที่ลำโพง เรียกความถี่ที่จับไปนี้ว่า BFO เช่น ถ้าความถี่ IF เป็น 455 kHz และ BFO จะถูกจับไว้ที่ 456 kHz หรือ 454 kHz ความถี่ผลต่างเท่ากับ 1 kHz ซึ่งโดยทั่ว ๆ ไป BFO สามารถจับได้ที่หน้าเครื่องรับ

- วงจรควบคุมความถี่อัตโนมัติ (Automatic Frequency Control : AFC) วงจรนี้ใช้ในการรักษา ระยะห่างของความถี่ระหว่างความถี่ของสัญญาณ RF ที่รับได้ กับความถี่สัญญาณ RF จาก Local Oscillator ทั้งนี้ไม่คำนึงถึงการเลื่อนไป (Drift) ของความถี่จากแหล่งกำเนิดทั้งสองแหล่ง รูปภาพที่ ๒ - ๑๑ แสดงให้เห็นถึงส่วนประกอบพื้นฐานของวงจร AFC หากเกิดการเปลี่ยนความถี่ของ Local Oscillator จะเป็นผลให้เกิดการ

เปลี่ยนแปลงของความถี่ IF วงจร Discriminator จะทำหน้าที่ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงนี้โดยทันที เพื่อคงสภาพการทำงานของวงจร Local Oscillator ให้มีความคงที่ตลอดเวลา



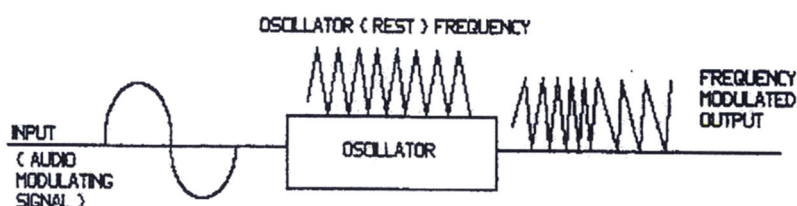
รูปภาพที่ ๒ - ๑๑ แผนภาพการทำงานของวงจร AFC

## ๒.๒ ระบบวิทยุแบบ FM

### ๒.๒.๑ ภาคเครื่องส่ง FM

ข่าวสารที่ส่งไปในรูปแบบของการไปเปลี่ยนความถี่ของคลื่นพาห์ โดยขึ้นอยู่กับรูปแบบของข่าวสารที่เปลี่ยนแปลงไป เป็นตัวกำหนดการเปลี่ยนแปลงของความถี่ เราเรียกรูปแบบการผสมคลื่นแบบนี้ว่า “Frequency Modulation : FM” หรืออาจอธิบายได้ว่าคลื่นที่ถูกทำการมอดูเลชันจะเปลี่ยนความถี่ไปตามข่าวสารที่ส่ง ขนาดของคลื่น FM ขณะออกอากาศจะมีขนาดคงที่ตลอดเวลา

การมอดูเลชันด้วยความถี่อย่างง่ายทำได้โดยนำไมโครโฟนต่อเข้ากับวงจรออสซิลเลเตอร์ของเครื่องส่ง ดังรูปภาพที่ ๒ - ๑๒ ซึ่งแสดงการที่สัญญาณเสียงต้นแบบถูกป้อนผ่านเข้ายังวงจรออสซิลเลเตอร์ จะทำให้คลื่นความถี่ที่ผลิตจากวงจรออสซิลเลเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงไปตามสัญญาณเสียงต้นแบบ



รูปภาพที่ ๒ - ๑๒ การผลิตคลื่น FM อย่างง่าย

#### ๒.๒.๑.๑ แบนด์ด้านข้างของคลื่น FM

ในการมอดูเลชันด้วยความถี่ จะทำให้เกิดคลื่น FM ที่มีการสร้างความถี่ใหม่ด้านข้างทั้งด้านที่มีความถี่สูงกว่าและต่ำกว่าความถี่คลื่นพาห์ ในลักษณะเช่นเดียวกับคลื่นแบบ AM ที่มีแบนด์ด้านข้างจำนวน ๒ ข้าง ซึ่งมีความแตกต่างกัน คือจำนวนของแบนด์ด้านข้างที่เกิดขึ้นในระบบ AM

ในแต่ละความถี่ที่จะทำการมอดูเลต จะปรากฏความถี่ด้านข้างเกิดขึ้นเป็นคู่ (USB และ LSB) ซึ่งก็คือผลรวมและผลต่างของความถี่ของเสียงต้นแบบกับความถี่คลื่นพาห์ แต่ในระบบ FM ในแต่ละความถี่ต้นแบบหลังจากสร้างความถี่ด้านข้างขึ้นใหม่ จำนวน ๑ คู่แล้ว คู่ความถี่นี้จะสร้างความถี่ฮาร์โมนิก (Harmonic) ของตนเองขึ้น ซึ่งความถี่ฮาร์โมนิกนี้จะมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน (Fundamental Frequency) โดยสร้างขึ้นเป็นจำนวนไม่รู้จบ (Infinite) เพียงแต่จะมีขนาดลดลงเรื่อย ๆ เท่านั้น

ความแตกต่างกันอีกประการหนึ่งระหว่าง AM กับ FM คือ พลังงานของแบนด์ด้านข้างของ AM ไม่เกี่ยวข้องกับพลังงานของคลื่นพาห์ แต่ใน FM พลังงานของแบนด์ด้านข้างจะได้มาจากพลังงานของคลื่นพาห์ นั่นคือคลื่นพาห์ที่ออกอากาศจะมีขนาดพลังงานที่ลดลงมาก เมื่อเทียบกับคลื่นพาห์ก่อนการมอดูเลชัน โดยพลังงานของแบนด์ด้านข้างจะมากหรือน้อยขึ้นกับความถี่ของคลื่นต้นแบบและความถี่เบี่ยงเบนสูงสุด (Maximum Deviation) ของคลื่นพาห์ โดยในบางกรณีอาจไม่ปรากฏว่าคลื่นพาห์มีพลังงานออกอากาศเลยซึ่งเป็นไปในทางอุดมคติที่ไม่ต้องการให้มีการสูญเสียพลังงานให้กับคลื่นพาห์ที่ไม่บรรจุข่าวสารใด ๆ นั่นเอง

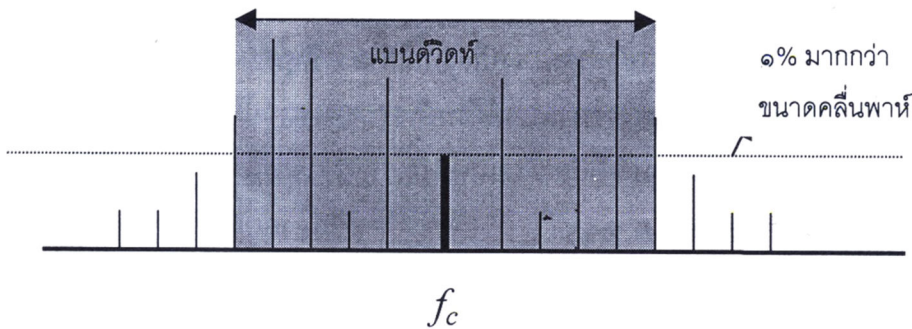
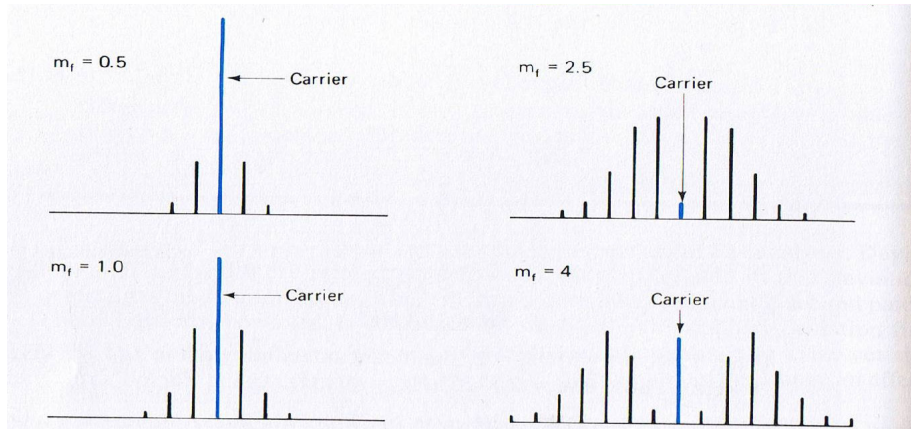
### ๒.๒.๑.๒ แบนด์วิดท์ของคลื่น FM

แบนด์วิดท์ของคลื่น FM คือช่วงความถี่ระหว่างความถี่บนสุดของแบนด์ด้านบนจนถึงความถี่ล่างสุดของแบนด์ด้านล่าง โดยใช้ขนาดของพลังงานคลื่นเป็นขอบเขต กล่าวคือ วัตต์ช่วงกว้างเฉพาะพลังงานที่มีขนาดเกินกว่า ๑% ของขนาดคลื่นพาห์ที่ออกอากาศไป (Significant Frequency) ดังแสดงในรูปภาพที่ ๒.๑๓ โดยปกติคลื่น FM มีแบนด์วิดท์กว้างมาก เมื่อเทียบกับคลื่น AM ดังนั้นจึงต้องใช้ความถี่คลื่นพาห์สูงกว่าที่ใช้ใน AM ในการส่งข่าวสารแบบเดียวกัน

โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบที่มีการมอดูเลชันแบบ FM ในระบบใหญ่ ซึ่งมีผู้ใช้เป็นจำนวนมาก จึงต้องการขนาดแบนด์วิดท์กว้างมากกว่าการมอดูเลชันที่มีคลื่นเสียงต้นแบบเพียง ๑ เสียง เรียกระบบเช่นนี้ว่า ระบบ FM แบนด์กว้าง (Wideband FM) อย่างไรก็ตาม ด้วยข้อจำกัดของขนาดแบนด์วิดท์ที่ใช้ในระบบ FM ก็อาจใช้ระบบ FM แบนด์แคบ (Narrowband FM) ซึ่งขนาดของแบนด์วิดท์ในขนาดใกล้เคียงกับที่ใช้ใน AM ในการส่งข่าวสารเดียวกัน อย่างไรก็ตามระบบแบนด์แคบจะทำให้เกิดข่าวสารหรือเสียงที่รับได้เกิดการผิดเพี้ยนไป (Distortion)

แบนด์วิดท์แสดงจำนวนของพื้นที่ที่สเปกตรัมต้องการในการส่งข่าวสาร และเป็นตัวแปรที่สำคัญในการวางแผนสำหรับการจัดสรรความถี่ให้กับหน่วยต่าง ๆ ทั้งนี้การทราบแบนด์วิดท์ไม่เพียงแต่ที่จะแสดงความกว้างของสเปกตรัมที่ต้องใช้เท่านั้น แต่ยังช่วยเป็นข้อมูลเพื่อตรวจสอบมิให้มีการจัดสรรความถี่ใกล้เคียงให้กับหน่วยงานอื่น ที่อาจทำให้เกิดการรบกวนได้อีกด้วย ทั้งนี้มีความหมายของแบนด์วิดท์อยู่สามชนิดที่ต้องทำความเข้าใจ คือ





รูปภาพที่ ๒ - ๑๓ แสดงกำลังงานที่กระจายอยู่ในแบนด์วิดท์แบบ FM

- แบนด์วิดท์ที่จำเป็น (Necessary Bandwidth) ได้แก่ ช่วงกว้างของความถี่ที่เพียงพอต่อการส่งข้อมูลข่าวสารใด ๆ โดยให้ได้คุณภาพหรืออัตราเร็วได้ตามที่กำหนด โดยทั่วไปมีขนาดเท่ากับแบนด์วิดท์ที่ได้รับอนุญาต
- แบนด์วิดท์ที่ได้รับอนุญาต (Authorised Bandwidth) ได้แก่ แถบของความถี่ที่ได้รับจัดสรรให้ใช้งานได้ โดยมักอ้างอิงมาจากขนาดของแบนด์วิดท์ที่จำเป็นนั่นเอง
- แบนด์วิดท์ที่ใช้งาน (Occupied Bandwidth) ได้แก่ แถบความถี่ซึ่งบรรจุพลังงานของการแพร่คลื่นไว้เท่ากับ ๙๙.๕% ของพลังงานเฉลี่ยออกอากาศ

**๒.๒.๑.๔ การคำนวณขนาดแบนด์วิดท์ที่ต้องการ**

การคำนวณหาแบนด์วิดท์ที่ต้องการ (Bn) มีหลายแนวทางขึ้นอยู่กับชนิดของระบบที่มีอยู่ ในที่นี้จะกล่าวถึงแบบ AM, ISB, FM แบบช่องเดียว

- การแพร่คลื่นแบบ AM/ISB

$$B_n = f_m N$$

- เมื่อ  $B_n$  = แบนด์วิดท์ที่ต้องการ
- $f_m$  = ความถี่ต้นแบบ (เสียง) ที่มีค่ามากที่สุด
- $N$  = จำนวนของแบนด์ด้านข้าง (Sideband)

ตัวอย่าง : ระบบ AM SSB ใช้เสียงต้นแบบที่มีความถี่สูงสุด 3 kHz

$$B_n = f_m = 3 \times 1$$

$$= 3 \text{ kHz}$$

ตัวอย่าง : ระบบ 2-Independent Sideband ใช้เสียงต้นแบบที่มีความถี่สูงสุด ๓ kHz

$$B_n = f_m = 3 \times 2$$

$$= 6 \text{ kHz}$$

- การแพร่คลื่น FM ช่องเดียว

$$B_n = 2 (f_m + f_d K)$$

เมื่อ  $f_m$  = ความถี่ต้นแบบ (เสียง) ที่มีค่ามากที่สุด (3 kHz)

$f_d$  = ค่าความถี่เบี่ยงเบนของคลื่นพาห้โดยเฉลี่ย (rms frequency deviation)

K = ค่า factor ที่เปลี่ยนค่าตามการแพร่คลื่นและขึ้นอยู่กับความเพี้ยนของสัญญาณที่ยอมรับได้ มีค่าระหว่าง 0-1 (ตามปกติ K = 1)

ตัวอย่าง D = 10 kHz , K = 1

$$B_n = 2 (f_m + f_d K)$$

$$= 2 (3 + (10) (1)) = 6 + 20$$

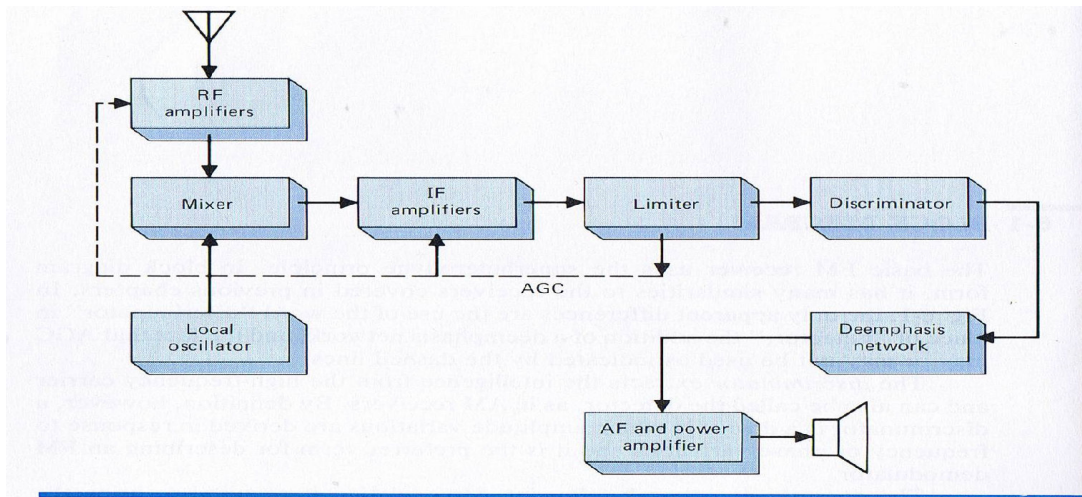
$$= 26 \text{ kHz}$$

### ๒.๒.๒ ภาคเครื่องรับวิทยุ FM

โดยทั่วไปแล้ว เครื่องรับวิทยุแบบ FM จะใช้หลักการทำงานของ Superheterodyne จาก Block Diagram ในรูป ๒.๑๔ จะเห็นว่า มีลักษณะคล้ายกับภาครับอื่น ๆ ที่ผ่านมา สิ่งที่แตกต่างกันก็คือในระบบวิทยุ AM วงจรที่ใช้แยกสัญญาณเสียงออกจากสัญญาณ RF เรียกว่า วงจร Detector แต่งในเครื่องรับวิทยุ FM จะเรียกว่า “Discriminator” ซึ่งจะทำหน้าที่เดียวกับชุด Detector คือแยกสัญญาณข่าวสารออกจากสัญญาณคลื่นพาห้ (Carrier) ความถี่สูง การที่เรียกว่า วงจร Discriminator ก็เพราะการทำงานที่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณทางความถี่หรือเฟสนั่นเอง

นอกจากนั้น อาจมีวงจรพิเศษบางวงจร เช่น De-emphasis Network ที่ทำหน้าที่ปรับค่าแอมพลิจูดของสัญญาณข่าวสารความถี่สูงให้กลับสู่แอมพลิจูดที่เหมาะสมสัมพันธ์กับความถี่ที่ต่ำกว่า ก่อนส่งเข้าสู่ภาคขยายสัญญาณเสียง สาเหตุจากวงจร Pre-emphasis ภาคส่งผลิตสัญญาณ Noise ที่มีความแรงสูงมากกว่าสัญญาณข่าวสาร

ในส่วนของภาค AF and Power Amplifier จะทำหน้าที่นำสัญญาณเสียงมาขยายให้มีขนาดใหญ่ขึ้นตามต้องการ นอกจากนั้นแล้วยังมีภาค AGC (Automatic Gain Control) ซึ่งเราคงคุ้นเคยในภาคเครื่องรับของวิทยุแบบ AM ทำหน้าที่ร่วมกับวงจร Limiter ควบคุมระดับแอมพลิจูดของสัญญาณ Output ให้คงที่ไม่ให้เกินระดับสูงสุดของการทำงานของวงจร Limiter เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนที่มาจากยอดแอมพลิจูดของสัญญาณที่มีความแรงหรือต่ำมากๆ ในระบบวิทยุ FM แบบเก่าจะใช้วงจร AFC (Automatic Frequency Control) เพื่อใช้ป้องกันการเปลี่ยนแปลงขึ้นลง (Drift) ของความถี่ชุด Local Oscillator



รูปภาพที่ ๒ - ๑๔ Block Diagram ของภาครับวิทยุแบบ FM

อันเป็นหัวใจสำคัญของเครื่องรับแบบ FM แต่ปัจจุบันไม่นิยมใช้วงจร AFC แล้ว เพราะวงจรผลิตความถี่ปัจจุบันสามารถผลิตความถี่ที่มีความคงที่สูง

### ๒.๒.๒.๑ ความไวของเครื่องรับ (Receiver Sensitivity)

ความไวของเครื่องรับเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอันหนึ่ง ดังนั้น การทำความเข้าใจในเรื่องความไวของเครื่องรับวิทยุจึงเป็นเรื่องสำคัญสำหรับนายทหารที่ทำหน้าที่ควบคุมหรือบริหารความถี่ในทุกระดับ ความไวของเครื่องรับวิทยุ ได้แก่ การที่เครื่องรับสามารถรับเอาพลังงานที่มีขนาดต่ำมากแต่เพียงพอที่จะได้รับพลังงานที่มีค่ามากกว่าระดับสัญญาณรบกวนที่เครื่องรับกำเนิดขึ้นเป็นค่าประจำของเครื่องรับได้ อย่างไรก็ตามระดับพลังงานที่มากกว่าจะต้องมีค่าเพียงพอค่าหนึ่งที่จะสามารถทำให้รับข้อมูลข่าวสารนั้นได้ด้วย

### ๒.๒.๒.๒ ระดับสัญญาณรบกวนภายในเครื่องรับ (Noise threshold)

สัญญาณรบกวน เกิดจากการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านตัวนำทำให้เกิดการชนกันภายในสารตัวนำ จึงทำให้อุณหภูมิของตัวนำเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันโมเลกุลของมันจะถูกกระตุ้นมากขึ้น รวมทั้งเกิดการชนกันทางอิเล็กทรอนิกส์เร็วมากขึ้นหากอุณหภูมิเครื่องรับเพิ่มขึ้น จึงทำให้สัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้น สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิของตัวนำ ซึ่งชนิดของสัญญาณรบกวนนี้เป็นสัญญาณรบกวนที่ถือว่าเป็นตัวกำหนดค่าความไวของเครื่องรับแต่ละเครื่อง เรียกสัญญาณรบกวนนี้ว่าสัญญาณรบกวนเชิงความร้อน (thermal Noise) สัญญาณรบกวนเชิงความร้อนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิและแบนด์วิดท์ของเครื่องรับ การคำนวณระดับของสัญญาณรบกวน (noise threshold) ที่เครื่องรับวิทยุ เป็นดังนี้

เมื่อ  $P_n$  = เป็นระดับของสัญญาณรบกวนมีหน่วยเป็นวัตต์

$K$  = ค่าคงที่ Boltzmann หรือ  $1.38 \times 10^{-23}$  joule / degree

$$P_n = KT_0B$$

$T_0$  = เป็นอุณหภูมิห้อง หน่วยเป็นองศา Kelvin (โดยปกติใช้อุณหภูมิห้องที่ ๒๙๐ องศา Kelvin)

$B$  = แบนด์วิธของภาคขยาย IF ภาคแรกของเครื่องรับ มีหน่วยเป็น Hertz

สมการข้างบน สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเดซิเบลและแทนเป็นค่าของ Noise Threshold ( $T_n$ ) ได้ดังนี้

$$T_n = 10 \log P_n = 10 \log K + 10 \log T_0 + 10 \log B$$

แทนค่า  $K$  และ  $T_0$  จะได้

$$T_n = 10 \log 1.38 \times 10^{-23} + 10 \log 290 + 10 \log B$$

$$T_n = -228.60121 + 24.62398 + 10 \log B$$

$T_n = -203.97723 + 10 \log B$  หรือเขียนใหม่ให้เป็นตัวเลขที่ง่ายต่อการคำนวณ คือ

$$T_n = -204 + 10 \log B \quad (\text{dBW})$$

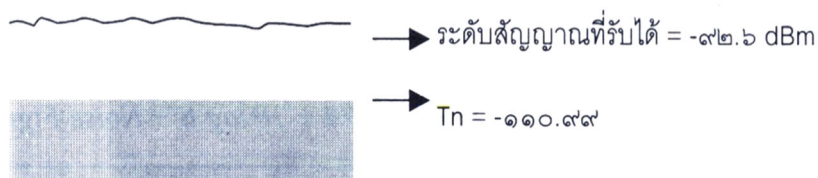
หรือแสดงในหน่วย dBm ได้คือ

$$T_n = -174 + 10 \log B \quad (\text{dBm})$$

ตัวอย่าง ๒.๑ เครื่องรับมีแบนด์วิธของภาค IF ขนาด 2 MHz

$$\begin{aligned} T_n (\text{dBm}) &= -174 + 10 \log 2 \times 10^6 \\ &= -174 + 63.0103 \\ &= -110.9897 \text{ dBm} \end{aligned}$$

ค่า  $-110.9897$  dBm เป็นระดับของ Noise Threshold สำหรับเครื่องรับนี้ ดังนั้นสัญญาณที่ต้องการทุกชนิดที่เข้ามาถึงเครื่องรับนี้ ต้องมีค่ามากกว่า  $-110.9897$  dBm ของ Noise Threshold จึงจะสามารถรับสัญญาณนั้นได้ เช่น สัญญาณที่รับเข้ามามีค่าความเข้มของสัญญาณ



รูปภาพที่ ๒ - ๑๕ แสดงระดับสัญญาณที่รับได้มีความเข้มมากกว่า Noise Threshold

### ๒.๒.๒.๓ อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio)

อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio : SNR) คือ อัตราส่วนการเปรียบเทียบของระดับสัญญาณที่รับได้ต่อระดับของ noise threshold หรือ S/N ซึ่งตัวเลขที่ใช้ในการคำนวณหา SNR มักมีค่าน้อยมาก จึงมักใช้วิธีการคำนวณในหน่วยเดซิเบล

$$\text{เนื่องจาก } 10 \log (S/N) = 10 \log S - 10 \log N$$

$$\text{SNR} = S \text{ (dB)} - T_n \text{ (dB)}$$

จากตัวอย่างที่ ๒.๑

$$\text{SNR} = -92.6 \text{ dBm} - (-110.9897 \text{ dBm})$$

$$\text{SNR} = 18.3897 \text{ dB}$$

จะเห็นว่า ค่า SNR จะมีค่าเป็นบวกถ้าระดับของสัญญาณมากกว่าระดับของ Noise Threshold และ ค่า SNR จะมีค่าเป็นลบถ้าระดับสัญญาณน้อยกว่าระดับของ Noise Threshold

### ๒.๒.๒.๔ ค่าของ Noise Figure

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะมีผลต่อระดับของสัญญาณรบกวนค่าประจำของเครื่องรับทุกเครื่อง ในอุณหภูมิห้องที่อุณหภูมิ ๒๙๐ องศาเคลวิน ซึ่งใช้เป็นอุณหภูมิอ้างอิง (TO) การคำนวณระดับ Noise Threshold จะคำนวณโดยสมการ  $T_n = -174 + 10 \log B$  แต่โดยธรรมชาติเครื่องรับแต่ละเครื่องจะมีค่าประจำของอุณหภูมิแตกต่างกันไป ซึ่งอาจมีค่าสูงหรือต่ำกว่า ๒๙๐ องศาเคลวิน (อุณหภูมิ ๒๙๐ องศาเคลวิน = ๑๗ องศาเซลเซียส = ๖๓ องศาฟาเรนไฮด์)

Noise Figure เป็นค่าที่ใช้แสดงความแตกต่างของ Noise Temperature ของเครื่องรับนั้น ๆ กับ Noise Temperature ที่ ๒๙๐ องศาเคลวิน และสามารถนำไปบวก/ลบจากสมการข้างต้น เพื่อหาค่าที่แท้จริงของเครื่องรับเครื่องนั้น ซึ่งสามารถคำนวณหาค่า  $T_n$  ได้จากสมการดังนี้

$$T_n \text{ (dBm)} = -174 + 10 \log B + \text{Noise Figure}$$

ตัวอย่างที่ ๒.๒ เครื่องรับ AM มีแบนด์วิดท์ของ IF เท่ากับ 1.2 MHz และมีค่า Noise Figure

เท่ากับ 6 dB จงคำนวณหาความไวของเครื่องรับ AM

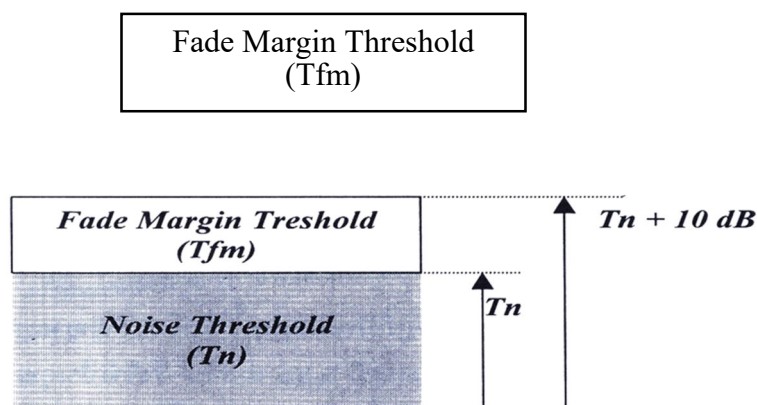
$$T_n \text{ (dBm)} = -174 + 10 \log B + \text{Noise Figure}$$

$$= -174 + 60.79181 + 6 \text{ dB} \quad \text{หรือ} \quad = -107.20819 \text{ dBm}$$

เครื่องรับนี้มี Noise Threshold หรือ ความไว เท่ากับ -107.2 dBm

### ๒.๒.๒.๕ การคำนวณความไวของเครื่องรับแบบ FM

เครื่องรับแบบ FM ซึ่งมักใช้งานในย่าน VHF/UHF ทั้งนี้เนื่องจากสามารถใช้แบนด์วิดท์ที่มีขนาดเพียงพอดต่อขนาดแบนด์วิดท์ที่จำเป็นของคลื่นแบบ FM ดังที่กล่าวมาแล้ว การใช้งานความถี่นี้มักประสบปัญหาของการจางหาย (Fading) อันเนื่องมาจากการเกิดสัญญาณหักล้างหรือเสริมกันจากคลื่นสะท้อน ทำให้ต้องมีการเผื่อค่าการจางหายนี้ไว้ด้วยค่าความไวของเครื่องรับแบบ FM เรียกว่า Fade Margin Threshold ( $T_{fm}$ ) สามารถคำนวณได้โดยเผื่อค่าสัญญาณจางหายเหนือกว่า Noise threshold ในเครื่องรับปกติอีก 10 dB ตามรูปภาพที่ ๒ - ๑๖



รูปภาพที่ ๒ - ๑๖ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Noise Threshold ( $T_n$ ) กับ Fade Margin Threshold

ดังนั้นการคำนวณค่า  $T_{fm}$  หรือ ความไวของเครื่องรับ FM สามารถใช้ความสัมพันธ์กับค่า  $T_n$  คำนวณได้ดังนี้

$$T_{fm} = T_n + 10 \text{ dB}$$

ตัวอย่างที่ ๒.๓ จงคำนวณค่า  $T_{fm}$  จากเครื่องรับในตัวอย่างที่ ๒.๒

$$\begin{aligned} \text{จาก } T_{fm} &= T_n + 10 \text{ dB} \\ &= -107.2 \text{ dBm} + 10 \text{ dB} \\ &= -97.2 \text{ dBm} \end{aligned}$$

### ๒.๓ ระบบวิทยุ SSB (Single Sideband)

#### ๒.๓.๑ ภาคเครื่องส่งระบบ Single Sideband (SSB)

ในหัวข้อที่ ๒.๑.๒ กล่าวถึงเครื่องส่งคลื่น AM แบบ DSB ที่ข่าวสารถูกบรรจุอยู่ในแบนด์ด้านข้างทั้งสอง (USB และ LSB) โดยที่ในแบนด์แต่ละข้างต่างก็บรรจุข่าวสารอันเดียวกัน ขนาดของข่าวสารจะแสดงถึงขนาดของแต่ละแบนด์ รวมทั้งความถี่ของข่าวสารก็คือผลต่างระหว่างคลื่นพาห้และความถี่ในแต่ละแบนด์ (Sideband Frequency) ดังนั้นเราสามารถส่งข่าวสารโดยใช้แบนด์ด้านข้างอันใดอันหนึ่งเท่านั้นก็เป็นการเพียงพอแล้ว หลักการของ SSB ก็คือ ส่งแบนด์ด้านข้างออกอากาศเพียงด้านเดียว โดยก่อนออกอากาศ

เครื่องส่งจะใช้ฟิลเตอร์ หรือ วงจรกรอง (Filter) กรองแบนด์อีกด้านที่ไม่ต้องการให้ออกไป ในขณะที่คลื่นพาห์เองก็ไม่มีควมจำเป็นในการส่งข่าวสาร ซึ่งสามารถกรองออกไปด้วย อย่างไรก็ตามในการติดต่อสื่อสารมีความจำเป็นต้องใส่คลื่นพาห์เข้าไปอีกที่เครื่องรับ เพื่อให้การตีมอดูเลชั่น (Demodulation) ทำงานได้อย่างถูกต้อง ในระบบนี้เรียกว่า Single Sideband Suppressor Carrier (SSBSC) ซึ่งในระบบ SSB มีข้อดีที่เหนือกว่าระบบ AM แบบ DSB ธรรมดา คือ

- ต้องการแบนด์วิดท์ที่มีขนาดแคบลง ในระบบสื่อสารด้วยเสียง ในระบบ AM DSB ต้องการแบนด์วิดท์ถึง 6 kHz ในขณะที่ระบบ SSB เมื่อต้องการส่งข่าวสารเดียวกันต้องการแบนด์วิดท์เพียง 3 kHz เท่านั้น จะเห็นได้ว่าเป็นการลดแบนด์วิดท์ในการส่งลงถึง ๕๐% ซึ่งจะทำให้สามารถบริหารการใช้ความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพในการสื่อสารย่าน HF ที่มีการใช้งานอย่างคับคั่ง

- ใช้กำลังส่งออกอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Conservation Power) เมื่อแบนด์ข้างด้านหนึ่งถูกกำจัดออกไป พลังงานในแบนด์นั้นจะถูกนำไปรวมให้กับแบนด์ที่เหลือ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานได้มาก การส่งคลื่น AM แบบ SSB แบ่งได้เป็น ๒ แบบ คือ แบบที่ไม่กำจัดคลื่นพาห์ออก (full carrier) กับแบบที่ลดขนาดของคลื่นพาห์ (Suppressed Carrier)

- แบบที่กำจัดแบนด์ด้านข้างอันหนึ่งออกไป แต่ยังคงเหลือคลื่นพาห์อยู่ ระบบนี้เรียกว่า Single Sideband Full Carrier ทั้งนี้หน้าที่หลักของคลื่นพาห์ คือนำพาข่าวสารไปกับคลื่นพาห์ที่มีความถี่ที่สูงขึ้น ตัวคลื่นพาห์เองไม่ได้บรรจุข่าวสารไว้เลย แต่ยังคงมีความจำเป็นสำหรับเครื่องรับในกระบวนการตีมอดูเลชั่น นอกจากนั้นยังนำไปใช้สำหรับวงจร Automatic Gain Control ในเครื่องรับอีกด้วย

- แบบที่ลดหรือกำจัดแบนด์ด้านข้างอันหนึ่งออกไป รวมทั้งลดขนาดของพลังงานของคลื่นพาห์ลง ระบบนี้เรียกว่า Single Sideband Reduced/ Suppressed Carrier ทั้งนี้การส่งคลื่นพาห์ไม่มีความจำเป็นต้องใช้พลังงานเต็มที่เหมือนกับในระบบ DSB จึงสามารถลดหรือกำจัดพลังงานคลื่นพาห์ได้ และเอาพลังงานที่ลดหรือกำจัดไปเพิ่มให้แบนด์ด้านข้างที่บรรจุข่าวสาร ซึ่งกระบวนการลดหรือกำจัดคลื่นพาห์จะกระทำที่เครื่องส่ง ดังนั้นที่เครื่องรับ SSB จึงต้องสร้างสัญญาณที่มีความถี่เดียวกับคลื่นพาห์ขึ้นก่อน แล้วจึงแทรกเข้าไปในคลื่น AM ที่ถูกลดหรือกำจัดคลื่นพาห์มาจากเครื่องส่ง จากนั้นจึงส่งผ่านวงจรตีมอดูเลชั่น จะได้คลื่นต้นแบบต่อไป

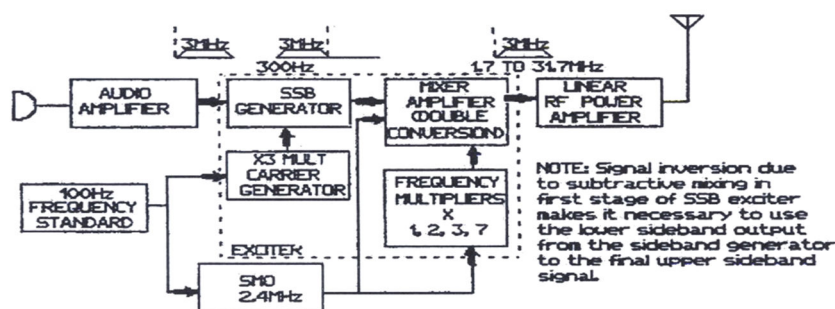
- ลดความผิดเพี้ยนของสัญญาณ (Minimization of Distortion) ในระบบ AM DSB ที่มีแบนด์ด้านข้างสองอันนั้น คลื่นต่างความถี่กันจะต้องมาถึงเครื่องรับด้วยเฟสที่สัมพันธ์กันเช่นเดียวกับตอนที่ส่งจากเครื่องส่ง ในทางปฏิบัติคลื่นต่างความถี่กันจะใช้เวลาในการเดินทางในตัวกลางไม่เท่ากัน จึงมักประสบปัญหาคลื่นที่มาถึงภาครับมีเฟสต่างออกไปจากเดิม ซึ่งเป็นสาเหตุของสัญญาณที่รับได้ผิดเพี้ยน (Distorted) ดังนั้นคลื่น DSB ที่มีแบนด์วิดท์มากกว่าคลื่น SSB ถึงสองเท่า (มีจำนวนความถี่ในสเปกตรัมมากกว่า) มีความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่รับได้มากกว่าแบบ SSB

- ลดการรบกวน (Reduction of Interference) ระบบ AM DSB คลื่นพาห์จะส่งออกอากาศตลอดเวลาเมื่อกดปุ่มพูด (Push-to-Talk) แต่ในระบบ SSB จะออกอากาศเฉพาะเมื่อทำการมอดูเลตเท่านั้น (เนื่องจากการกำจัดคลื่นพาห์) เพราะจะออกอากาศเฉพาะในส่วนของแบนด์ด้านข้าง (USB หรือ LSB

อันใดอันหนึ่ง) ดังนั้นในระบบ AM DSB เมื่อมีการกดคีย์ออกอากาศ (ขณะที่ไม่มอดูเลต) จะเกิดสัญญาณคลื่นพาห์เพียงความถี่เดียว แต่ขณะที่มอดูเลตสัญญาณคลื่นพาห์ร่วมกับสัญญาณข่าวสารเกิดสัญญาณ ๒ สัญญาณ (USB และ LSB) เป็นผลให้เกิดเสียง Squeal และ Howls ขึ้นที่ภาครับจรรยาบขวายปกติได้ ในที่สุด ในขณะที่ระบบ SSB จะไม่เกิดปัญหานี้ทราบเท่าที่ไม่มีการส่งคลื่นพาห์ออกอากาศในขณะที่กดคีย์แล้ว ไม่มีเสียงพูด

รูปภาพที่ ๒ - ๑๗ แสดงแผนภาพการทำงานอย่างง่ายของเครื่องส่งระบบ SSB เมื่อคลื่นเสียงผ่านวงจรรขยาย (Audio Amplifier) วงจร SSB Generator จะผลิตสัญญาณ SSB โดยส่งคลื่น AM DSB ผ่านไปยังฟิลเตอร์เพื่อกรองเอาเฉพาะแบนด์ด้านข้างเพียงด้านเดียว (ด้วยวงจร crystal หรือ Mechanic ก็ได้) โดยมีความถี่ ชั้นกลาง หรือ Intermediate Frequency (IF) จากนั้น สัญญาณ SSB จะส่งผ่านไปยังภาคмикเซอร์ (Mixer) และ วงจรรขยาย (Amplifier) เพื่อแปลงไปเป็นความถี่ย่าน RF แต่ในระบบ SSB จะไม่มีคลื่นพาห์นำ (Pilot Carrier) จึงต้องการวงจรมผลิตคลื่นวิทยุ RF ที่มีเสถียรภาพอย่างมาก ซึ่งประกอบด้วยวงจรมผลิตความถี่มาตรฐาน 100 Hz และ Stabilized Master Oscillator (SMO) เพื่อสร้างเสถียรภาพให้สูงขึ้น

ความถี่มาตรฐานที่สร้างจาก Crystal Oscillator จะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเป็นอย่างมาก จึงควรมีการตรวจสอบอุณหภูมิในสถานที่ติดตั้งอย่างสม่ำเสมอ และความถี่มาตรฐานนี้เองจะเป็นตัวกำหนดความถี่เสถียรภาพของความถี่ทั้งหมดในเครื่องส่ง ซึ่งการผลิตความถี่ต่าง ๆ ในวงจรรย่อย หากไม่ออกแบบให้เหมาะสมแล้ว จะทำให้วงจรโดยรวมขาดเสถียรภาพไปทันที วงจรรย่อยดังกล่าวมี ๒ วงจร ได้แก่ วงจรมผลิตคลื่นพาห์ความถี่ IF และ วงจร SMO วงจรมผลิตคลื่นพาห์ความถี่ IF ทำหน้าที่ผลิตสัญญาณ SSB IF และทำการเปลี่ยนให้เป็นความถี่ RF ของสัญญาณ SSB ในทางปฏิบัติ ระบบ SSB จะใช้วงจรม SMO ในช่วงความถี่ 2 – 4 MHz จึงจะทำให้วงจรมผลิตความถี่มีเสถียรภาพสูง ส่วนความถี่ IF จะใช้ ความถี่ 300 kHz ซึ่งเป็นความถี่ใช้งานเหมาะสมที่สุด จากนั้นในขั้นตอนสุดท้ายก่อนออกอากาศสัญญาณ SSB ความถี่ IF จะถูกผสมกับคลื่นพาห์ (RF) และขยาย จากนั้นจึงป้อนเข้าสู่ภาคขยาย RF แล้วส่งต่อไปยังสายอากาศ เพื่อแพร่กระจายคลื่นออกอากาศต่อไป



รูปภาพที่ ๒.๑๗ บล็อกไดอะแกรมเครื่องส่ง SSB

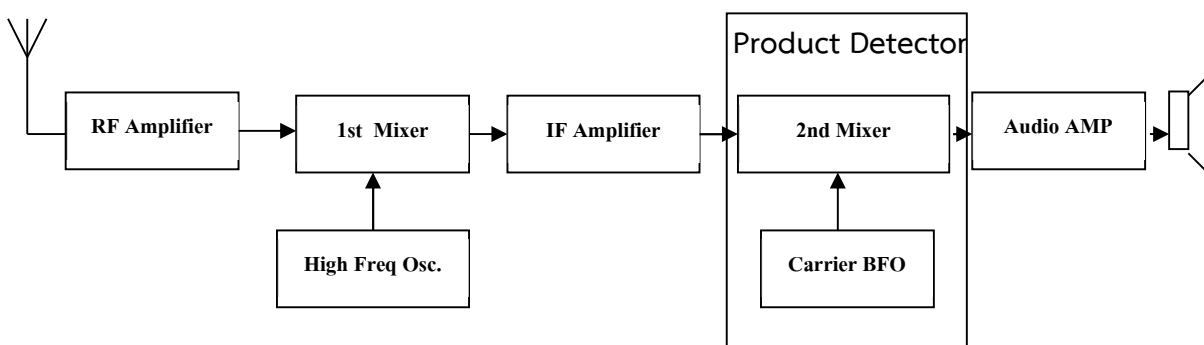


### ๒.๓.๒ ภาคเครื่องรับวิทยุแบบ SSB

- RF Amplifier ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ RF ที่รับจากสายอากาศให้สัญญาณมีความแรงขึ้นเพื่อส่งต่อไปยังภาค Mixer ที่อยู่ถัดไป
- High Frequency Oscillator ทำหน้าที่สร้างสัญญาณความถี่สูง เพื่อส่งไปยังภาค Mixer
- 1<sup>st</sup> Mixer ทำหน้าที่ผสมสัญญาณ RF กับสัญญาณ High Frequency Oscillator โดยหลักการ Heterodyning ซึ่งจะได้ Output Frequency จำนวนหนึ่งที่เกิดจากการผสมคลื่น และภายในวงจรภาค Mixer นี้ จะมีวงจร Sideband Filter ทำหน้าที่เลือกเอาสัญญาณแบนด์ใดแบนด์หนึ่งที่ต้องการ (LSB or USB) เพื่อส่งผ่านไปยังภาค IF Amplifier ที่อยู่ถัดไป
- IF Amplifier ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ RF ให้มีขนาดที่เหมาะสม ก่อนส่งไปยัง 2<sup>nd</sup> Mixer
- Product Detector หรือเรียกว่า Beat Frequency Oscillator (BFO) ถ้าเป็นในระบบ AM จะเป็นวงจร Detector วงจร Product Detector นี้จะทำงานในแบบเดียวกันกับชุด Balance Modulation ในเครื่องส่ง แต่แทนที่จะเอา RF ผสมกับ AF เพื่อให้เกิด DSB แต่เอา IF หรือ RF ความถี่ต่ำมาผสมกับ RF Carrier (BFO) ให้ได้ AF ออกมา ฉะนั้นภาคนี้ จึงมีหน้าที่แยกเอาสัญญาณเสียงหรือข่าวสารออกมาก่อนส่งต่อไปยังภาค Audio Amplifier ต่อไป
- Audio Amplifier ทำหน้าที่ขยายระดับสัญญาณเสียงให้มีความแรงเพิ่มขึ้น แล้วจึงส่งผ่านไปยังลำโพงเพื่อทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณเสียง

### ๒.๔ ข้อกำหนดการใช้สัญลักษณ์บ่งชี้คุณลักษณะของการแพร่คลื่นวิทยุ (Emission Characteristics of Radio Transmission Law)

เป็นการกำหนดสัญลักษณ์เพื่อบ่งบอกคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของเครื่องส่ง ให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐานเดียวกัน (International Standard) แสดงอยู่ในรูปของตัวเลขและตัวอักษร ๙ ตัว (9 Alphanumeric Symbols) โดยทั่วไปมักแสดงอยู่ในรูปแบบของตัวเลขและตัวอักษร จำนวน ๗ ตัว สำหรับอักษรลำดับที่ ๘-๙ ไม่ค่อยพบเห็นบ่อยนัก โดยแยกออกเป็น ๓ กลุ่ม คือ



รูปภาพที่ ๒ - ๑๘ บล็อกไดอะแกรมเครื่องรับ SSB

๒.๔.๑ สัญลักษณ์ ๔ ตัวแรก แบ่งออกเป็น ๒ ส่วน คือ ตัวเลขแทนค่าของแบนด์วิดท์ (Necessary Bandwidth) เริ่มตั้งแต่ .001 Hz – 999 GHz และตัวอักษรแทนหน่วยของความถี่ ที่ใช้เป็นมาตรฐานมี ๔ ตัวอักษร คือ H = Hertz , K = Kilohertz , M = Megahertz , G = Gigahertz

๒.๔.๒ สัญลักษณ์ ๓ ตัวถัดมา อธิบายคุณลักษณะพื้นฐานของการแพร่กระจายคลื่น โดยแบ่งออกเป็น ๓ ส่วนคือ

๒.๔.๒.๑ สัญลักษณ์ตัวแรกเป็นตัวอักษร บอกให้ทราบถึงแบบของการผสมคลื่นของคลื่นพาห้หลัก ดังสัญลักษณ์ที่แสดงด้านล่าง เช่น A = Double Sideband เป็นต้น

<b>1. First Symbol</b> - type of modulation of the main carrier		
(a)	Emission of an unmodulated carrier	N
(b)	Emission in which the main carrier is amplitude modulated (including cases where sub-carriers are angle modulated)	
	(i) Double sideband	A
	(ii) Single sideband, full carrier	H
	(iii) Single sideband, reduced or variable level carrier	R
	(iv) Single sideband, suppressed carrier	J
	(v) Independent sideband	B
	(vi) Vestigial sideband	C
(c)	Emission in which the main carrier is angle modulated	
	(i) Frequency modulation	F
	(ii) Phase modulation	G
(d)	Emission in which the main carrier is amplitude and angle modulated either simultaneously or in a pre-established sequence	D
(e)	Emission of pulses <sup>(1)</sup>	
	(i) Unmodulated sequence of pulses	P
	(ii) A sequence of pulses -	
	(1) modulated in amplitude	K
	(2) modulated in width/duration	L
	(3) modulated in position/phase	M
	(4) in which the carrier is angle modulated during the period of the pulse	Q
	(5) which is a combination of the foregoing or is produced by other means	V
(f)	Cases not covered above, in which an emission consists of the main carrier modulated, either simultaneously or in a pre-established sequence, in a combination of two or more of the following modes; amplitude, angle, pulse	W
(g)	Cases not otherwise covered	X

๒.๔.๒.๒ สัญลักษณ์ตัวที่สอง (Second Symbol) มักแสดงเป็นตัวเลขมากกว่าตัวอักษร เพื่อบอกให้ทราบถึงลักษณะของ Modulating Signal ดังสัญลักษณ์ที่แสดงด้านล่าง เช่น 0 = No Modulating Signal หรือ 3 = เป็น Single Channel บรรจุข่าวสารแบบอนาล็อก (Voice, Music) เป็นต้น

<b>2. Second Symbol</b> - nature of signal(s) modulating the main carrier		
(a)	No modulating signal	0
(b)	A single channel containing quantized or digital information without the use of a modulating sub-carrier <sup>(2)</sup>	1
(c)	A single channel containing quantized or digital information with the use of a modulating sub-carrier	2
(d)	A single channel containing analogue information	3
(e)	Two or more channels containing quantized or digital information	7
(f)	Two or more channels containing analogue information	8
(g)	Composite system with one or more channels containing quantized or digital information, together with one or more channels containing analogue information	9
(h)	Cases not otherwise covered	X

<b>3. Third Symbol</b> - type of information to be transmitted <sup>(3)</sup>		
(a)	No information transmitted	N
(b)	Telegraphy - for aural reception	A
(c)	Telegraphy - for automatic reception	B
(d)	Facsimile	C
(e)	Data transmission, telemetry, telecommand	D
(f)	Telephony (including sound broadcasting)	E
(g)	Television (video)	F
(h)	Combination of the above	W
(i)	Cases not otherwise covered	X

๒.๔.๒.๓ สัญลักษณ์ตัวที่สาม (Third Symbol) อยู่ในรูปของตัวอักษร บอกให้ทราบถึงแบบของข้อมูลข่าวสารที่ถูกส่งออกไป ตามสัญลักษณ์ที่แสดงด้านบน เช่น C = Facsimile หรือ F = การแพร่ภาพในระบบโทรทัศน์ เป็นต้น

๒.๔.๒.๔ สัญลักษณ์ ๒ ตัวสุดท้าย เป็นสัญลักษณ์ที่ใช้อธิบายรายละเอียดคุณลักษณะเพิ่มเติมจากที่อธิบายไว้ในสัญลักษณ์ ๗ ตัวแรก โดยสัญลักษณ์ตัวแรกบอกรายละเอียดของการส่งสัญญาณ ส่วนสัญลักษณ์ตัวที่สองแสดงถึงแบบของ Multiplexing

## การเขียน Emission System

- แบนด์วิดท์ที่จำเป็น อยู่ระหว่าง 0.10 – 999.99 Hz ควรแสดงในรูปของ Hertz ใช้ตัวอักษรในระหว่างจุดทศนิยม เช่น
  ๑. 15 Hz เขียนเป็น 15H0
  ๒. 15.1 Hz เขียนเป็น 15H1
- แบนด์วิดท์ที่จำเป็น อยู่ระหว่าง 1.00 – 999.99 kHz ควรแสดงในรูปของ Kilohertz ใช้ตัวอักษร K วางไว้ตรงตำแหน่งทศนิยม เช่น
  ๑. 2 kHz เขียนเป็น 2K00
  ๒. 2.85 kHz เขียนเป็น 2K85
- แบนด์วิดท์ที่จำเป็น อยู่ระหว่าง 1.00 – 999.99 MHz ควรแสดงในรูปของ Megahertz ใช้ตัวอักษร M วางไว้ตรงตำแหน่งทศนิยม เช่น
  ๑. 6 MHz เขียนเป็น 6M00
  ๒. 6.25 MHz เขียนเป็น 6M25

## ตัวอย่างของ EMISSION SYMBOLS และความหมายที่พบเห็นบ่อย ๆ

<u>SYMBOL</u>	<u>TYPE OF EMISSION</u>
6K00A3E	DOUBLE SIDEBAND, AM VOICE, 6 kHz BW
3K00J3E	SINGLE SIDEBAND VOICE, SUPPRESSED CARRIER, 3 kHz BW
9K00B9W	INDEPENDENT SIDEBAND, VOICE AND DATA, 9 kHz BW
30K0F3E	FM MODULATED VOICE, 30 kHz BW
1M30F9W	FM MODULATED VOICE AND DATA, 1.3 MHz BW
1K10F1B	HF TELETYPE, 50 BAUD
1K24F1B	HF TELETYPE, 75 BAUD

## บทที่ ๓

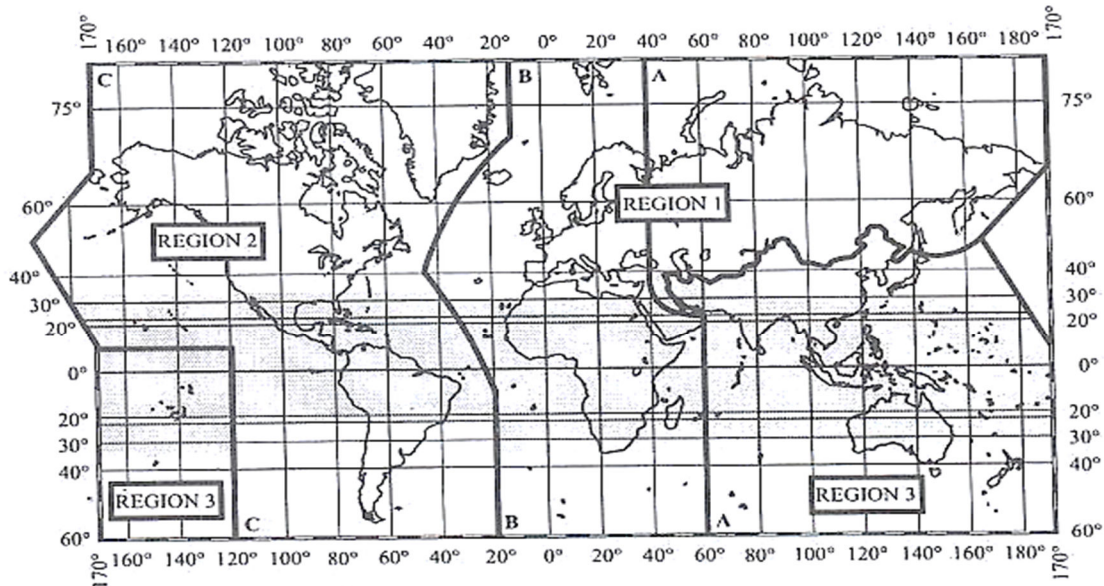
### ประเภทและการใช้งาน

#### ๓.๑ กล่าวนำ

กรมสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ทหารอากาศ ได้แบ่งประเภทและการใช้งานของระบบวิทยุตามภารกิจสนับสนุนทางด้านยุทธการและธุรการ เพื่อให้เป็นระบบที่มีความเป็นมาตรฐานสะดวกในการควบคุม กำกับดูแล กองโรงงาน กรมสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ทหารอากาศ เป็นหน่วยงานรับผิดชอบการซ่อมบำรุงระดับโรงงาน (Depot Maintenance) โดยรับผิดชอบการซ่อมบำรุงในสายงานระบบวิทยุ ๔ ประเภท ดังนี้

๑. ระบบวิทยุควบคุมการบิน (Air Traffic Control Radio System)
๒. ระบบวิทยุซิงเกิลไซด์แบนด์ (Single Sideband Radio System)
๓. ระบบวิทยุสื่อสารยุทธวิธี (Tactical Radio System)
๔. ระบบวิทยุข่ายควบคุมและสั่งการ (Command and Control Radio System)

เพื่อให้เกิดความเข้าใจเพิ่มมากขึ้น จะขอ นำข้อกำหนดในตารางจัดสรรคลื่นความถี่ที่กำหนดโดยสหภาพโทรคมนาคม (ITU : International Telecommunication Union) ได้แบ่งขอบเขตตารางความถี่ของประเทศสมาชิกในโลกออกเป็น ๓ ภูมิภาค (Region) ตามรูปภาพที่ ๓ - ๑



S5-01

รูปภาพที่ ๓ - ๑ การแบ่งส่วนของภูมิภาคในการกำหนดตารางคลื่นความถี่ของ ITU

Region 1 ประกอบด้วยประเทศในเขตแนวเส้น B ทางด้านทิศตะวันตก และ เขตแนวเส้น A ตอนบน ไปจนถึงแนวเขต C

Region 2 ประกอบด้วยประเทศในแนวเขตเส้น C ทิศตะวันตก ไปจนถึงแนวเส้นเขต B ทางทิศตะวันออก

Region 3 ประกอบด้วยประเทศในแนวเขต A – C บริเวณตอนล่าง

วัตถุประสงค์ของการกำหนดตารางความถี่ใช้งานออกเป็นภูมิภาคดังกล่าว ก็เพื่อให้บรรดาชาติสมาชิกของ ITU สามารถใช้งานความถี่ได้โดยปราศจากการรบกวนหรือเกิดการรบกวนกันน้อยที่สุด เพราะหากไม่มีการกำหนดกฎเกณฑ์ในการใช้ความถี่ ก็จะทำให้เกิดผลเสียต่อผู้ใช้งาน ตลอดจนการบริหารจัดการคลื่นความถี่ของแต่ละประเทศใช้งานก็จะขาดประสิทธิภาพ

สำหรับประเทศไทย ถูกจัดอยู่ในภูมิภาคที่ ๓ (Region 3) ดังนั้น การกำหนดระเบียบในการจัดสรรตารางคลื่นความถี่ใช้งานจึงต้องสอดคล้องตามข้อกำหนดของภูมิภาคที่ ๓ ที่ ITU กำหนดให้เป็นไปตามหลักเกณฑ์มาตรฐานสากล อย่างไรก็ตามแต่ละประเทศสมาชิกสามารถกำหนดข้อปฏิบัติหรือเงื่อนไขปลีกย่อยได้

### ๓.๒ ระบบวิทยุควบคุมการบิน (Air Traffic Control Radio System)

หมายถึงอุปกรณ์สื่อสารที่ถูกใช้ในการควบคุมกำกับดูแลกิจการการบินให้เป็นไปตามข้อกำหนดการบินของ FAA โดยแบ่งออกตามเขตพื้นที่บริการ ดังนี้

๑. เขตหอบังคับการบิน (Tower Control) หมายถึงเขตควบคุมการบินที่อยู่ในระยะไม่เกิน 15 NM

๒. เขตประชิดสนามบิน (Approach Control) หมายถึงเขตพื้นที่บริการในระยะประชิดสนามบินก่อนเครื่องบินเข้าสู่เขตหอบังคับการบิน ระยะทางทั่วไปอยู่ที่ 35 NM แต่บางสนามบินอาจมีระยะถึง 50 NM เช่น สนามบินดอนเมือง และสนามบินสุวรรณภูมิ เป็นต้น

๓. เขตเส้นทางการบิน (FIR : Flight Information Rule) หมายถึงเขตพื้นที่บริการที่อยู่นอกเหนือไปจากเขตพื้นที่บริการในข้อ ๑ และ ๒ เพื่อควบคุมการบินให้เป็นไปตามเส้นทางที่กำหนด

หน้าที่ของระบบวิทยุควบคุมการบินคือการควบคุมอากาศยานในการเดินอากาศ หรือควบคุมการจราจรทางอากาศให้เป็นไปตามกฎการบินที่ FAA กำหนด ทั้งนี้เพื่อให้นักบินสามารถนำเครื่องบินจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้อย่างปลอดภัย หรือการสนับสนุนการบินให้เป็นไปตามภารกิจที่ได้รับมอบหมาย มีย่านความถี่มาตรฐานที่ถูกกำหนดให้ใช้งาน ๒ ย่านความถี่ คือ VHF/AM และ UHF/AM โดยกำหนดย่านความถี่ VHF คือ 118.000 – 137.000 MHz สำหรับพลเรือนใช้งาน (Civilian Band) ส่วนกิจการทางทหาร ย่านความถี่ที่ถูกกำหนดให้ใช้งานย่าน UHF ความถี่ 225.000 – 399.975 MHz สำหรับประเทศไทยกำหนดความถี่ยกเว้นไว้ ๒ ย่านความถี่คือ 225 - 230 MHz ถูกกำหนดให้ใช้ในกิจการกระจายเสียง (Broadcasting) เป็นหลักและ 328.6 - 335.4 MHz กำหนดให้ใช้งานในกิจการเครื่องช่วยเดินอากาศเป็นหลัก

### ๓.๒.๑ คุณสมบัติย่านความถี่วิทยุควบคุมการบิน (VHF/UHF)

ย่านความถี่ VHF (30 - 300 MHz) และย่านความถี่ UHF (300 - 3000 MHz) ต่างก็มีคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกัน โดยมีลักษณะสำคัญดังนี้

๓.๒.๑.๑ สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความร้อนของตัวอุปกรณ์ (Thermal Noise และ Electrical Noise) มากกว่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติที่เรียกว่า "Atmospheric Noise"

๓.๒.๑.๒ ไม่มีผลกระทบจากบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ เนื่องจากเป็นย่านความถี่สูง สามารถทะลุทะลวงผ่านชั้นบรรยากาศนี้ไปได้ การเดินทางเป็นเส้นตรง (Directed Wave) จึงมักเรียกการสื่อสารในย่านความถี่นี้ว่า "การสื่อสารในแนวสายตา (Line of Sight : LOS)" โดยไม่ได้เดินทางโค้งไปตามผิวโลก ดังนั้นระยะทางในการติดต่อสื่อสารจึงขึ้นอยู่กับความสูงของสายอากาศระหว่างสถานีรับกับสถานีส่ง

๓.๒.๑.๓ มีแบนด์วิดท์กว้าง (Wide Bandwidth) กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับย่านความถี่ HF มาก รวมทั้งมีความยาวคลื่นสั้นกว่า ทำให้สายอากาศมีขนาดเล็กและสามารถใช้งานสื่อสารข้อมูลได้ดีกว่า

จากเหตุผลดังกล่าวนี้เอง ทำให้ระบบวิทยุควบคุมการบินถูกนำมาใช้ในการติดต่อในแบบจุดต่อจุด (Point to Point) หรือพื้นสู่พื้น (Ground to Ground) หรือแบบพื้นสู่อากาศ (Ground to Air) หรือ อากาศสู่อากาศ (Air to Air) ในการสื่อสารแนวสายตา (Line of Sight)

### ๓.๒.๒ แบบของระบบวิทยุควบคุมการบิน (VHF/AM และ UHF/AM)

วิทยุควบคุมการบินที่กองทัพอากาศมีใช้งานอยู่มีหลายแบบด้วยกัน และด้วยเหตุผลที่ประเทศไทยเป็นประเทศพันธมิตรกับสหรัฐอเมริกา อุปกรณ์ที่ถูกนำมาใช้ในระบบวิทยุควบคุมการบินและวิทยุอื่น ๆ ทางทหารจึงเป็นผลิตภัณฑ์ของสหรัฐฯ เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งใช้งานในหน่วยงานทางทหารของประเทศสหรัฐฯ ทำให้สามารถจัดซื้อเครื่องและอะไหล่เพื่อใช้ในการซ่อมบำรุงได้จากระบบความช่วยเหลือทางทหาร (FMS)

แม้ว่าวิทยุส่วนใหญ่ที่มีใช้งานใน ทอ. จะเป็นผลิตภัณฑ์ของสหรัฐฯ ก็ตาม แต่ก็มีผลิตภัณฑ์จากประเทศอื่น ๆ ที่ ทอ. ได้จัดหาใช้งาน เพื่อให้สอดคล้องกับการพัฒนาของเทคโนโลยีและสนับสนุนภารกิจของ ทอ. ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะเห็นได้จากโครงการระบบป้องกันทางอากาศภาคใต้ (RTADS Phase III) ระบบวิทยุควบคุมการบินจะเป็นเครื่องวิทยุรับ-ส่งแบบ PAE 3060 ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากประเทศอังกฤษ และในโครงการระบบป้องกันทางอากาศภาคเหนือ (RTADS Phase II) จะเป็นเครื่องรับส่งวิทยุที่เป็นผลิตภัณฑ์จากประเทศเยอรมนี

ปัจจุบันวิทยุควบคุมการบินที่ใช้งานอยู่ใน ทอ. ส่วนใหญ่ จะเป็นวิทยุประเภท Single Channel โดยใช้งานเป็นเครื่อง Primary และมีวิทยุประเภท Multi Channel ถูกใช้เป็นเครื่อง Backup ในกรณีเครื่อง Primary ขัดข้อง ต่อมาเทคโนโลยีทางวิทยุได้มีการพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว อีกทั้งความต้องการทางด้านยุทธการและการสนับสนุนภารกิจเพิ่มมากขึ้น จึงได้มีการนำเครื่องวิทยุรับส่งประเภท

Multi Channel มาใช้งานเป็นเครื่อง Primary และ Backup ดังจะเห็นได้จากโครงการระบบป้องกันทางอากาศของ ทอ. และคาดว่าวิทยุประเภท Single Channel ก็จะถูกทดแทนและหมดไปจากกองทัพอากาศในที่สุด

วิทยุควบคุมการบินที่มีใช้งาน สามารถแบ่งประเภทออกได้เป็น ๓ แบบ ดังนี้

๑. วิทยุควบคุมการบินแบบ Single-Channel
๒. วิทยุควบคุมการบินแบบ Multi-Channel
๓. วิทยุควบคุมการบินแบบ Multi-Channel – Multi Band –

Multimode

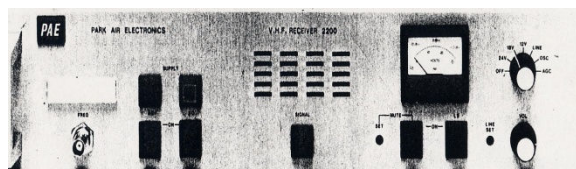
### ๓.๒.๒.๑ วิทยุควบคุมการบินแบบ Single Channel

หมายถึงเครื่องรับหรือเครื่องส่งวิทยุ ที่ผู้ใช้งานต้องทำการปรับแต่งเครื่องทางเทคนิคเสียก่อนที่จะเปลี่ยน Channel ไปใช้ความถี่อื่น ตัวอย่างเช่น ถ้าความถี่ใช้งานของเครื่องส่งวิทยุอยู่ที่ 236.6 MHz หากต้องการเปลี่ยนไปใช้งานที่ความถี่ 243.0 MHz จะต้องทำการปรับแต่งภาคผลิตความถี่เสียก่อนจึงจะติดต่อใช้งานที่ความถี่ใหม่ได้ เครื่องวิทยุแบบนี้จึงไม่สะดวกกับการใช้งานที่ต้องมีการปรับความถี่อยู่บ่อย ๆ อย่างไรก็ตามวิทยุประเภทนี้มีราคาถูกเมื่อเทียบกับวิทยุในแบบอื่น ๆ ติดตั้งและซ่อมบำรุงง่าย เนื่องจากวงจรไม่สลับซับซ้อน

วิทยุควบคุมการบินประเภทนี้ที่ทอ.มีใช้งานย่านความถี่ VHF/AM ความถี่อยู่ระหว่าง 116 – 149.9875 MHz ได้แก่ AN/GRT-21, AN/GRR-23 ยกเว้นวิทยุแบบ PAE 1250, PAE 2100 ย่านความถี่อยู่ระหว่าง 118 – 137 MHz สำหรับ UHF/AM ย่านความถี่อยู่ระหว่าง 225 - 399.975MHz



PAE 1250, PAE 2300



PAE2100, PAE2200



T-1108/GRT-21, T-1109/GRT-22



AN/GRR-23, AN/GRR-24

รูปภาพที่ ๓ - ๒ แสดงเครื่องรับและเครื่องส่งวิทยุควบคุมการบินแบบ Single Channel ที่ใช้งานใน ทอ.



รูปภาพที่ ๓.๒ แสดงเครื่องรับ และเครื่องส่งวิทยุ แบบ Single Channel ที่มีใช้งานอยู่ในกองทัพอากาศ แบบ VHF/AM Single Channel และแบบ UHF/AM Single Channel ที่มีใช้งานอยู่ในปัจจุบัน

### ๓.๒.๒.๒ วิทยุควบคุมการบินแบบ Multi Channel

หมายถึงวิทยุรับ-ส่ง ที่ผู้ใช้งานสามารถเปลี่ยนความถี่เพื่อใช้งาน Channel อื่น ๆ ได้โดยไม่ต้องทำการปรับแต่ง เครื่องวิทยุประเภทนี้สามารถใช้งานได้หลาย Channel ถูกออกแบบให้มีภาครับและภาคส่งอยู่ภายในตัวเครื่องเดียวกัน (Transceiver) เพื่อสะดวกในการนำไปใช้งานให้เหมาะสมกับการกิจ วิทยุประเภทนี้เมื่อเทียบกับวิทยุแบบ Single Channel พบว่าวงจรภายในมีความสลับซับซ้อน การติดตั้งและซ่อมบำรุงยุ่งยากกว่า

วิทยุควบคุมการบินประเภทนี้ที่ ทอ.ใช้งานอยู่เป็น VHF/AM Multi Channel ได้แก่ AN/GRC-211, UHF/AM Multi Channel แบบ AN/GRC-171 และดำเนินการตามโครงการ RTADS Phase II เป็น VHF/AM Multi Channel แบบ XU4200 และ UHF/AM Multi Channel แบบ XD4200 ของบริษัท Rohde & Schwarz ประเทศเยอรมนี ตามรูปภาพที่ ๓.๓ เป็นภาพเครื่องรับส่งวิทยุ แบบ AN/GRC-211, AN/GRC-171 เป็นเครื่องวิทยุที่อยู่ใน RTADS Phase I บางส่วน และ RTADS Phase II แบบ XU4200, XD4200



AN/GRC-211 & AN/GRC-171



XU4200 & XD4200



Jotron 7750 & 7750U



PAE T6T/T6R

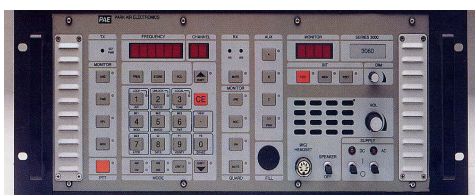


PAE T6T/T6R

รูปภาพที่ ๓ - ๓ วิทยุควบคุมการบินแบบ Multi Channel

### ๓.๒.๒.๓ วิทยุควบคุมการบินแบบ Multi Channel – Multi Band – Multi Mode

หมายถึงวิทยุรับ-ส่ง ที่ผู้ใช้งานสามารถเปลี่ยนความถี่เพื่อใช้งาน Channel อื่น ๆ ได้โดยไม่ต้องทำการปรับแต่ง เครื่องวิทยุประเภทนี้สามารถใช้งานได้หลาย Channel มี Mode เพื่อใช้ในการสนับสนุนการทำงานได้ทั้งแบบ AM, FM, TADIL-A และ Have Quick สามารถเลือกย่านความถี่ (Band) ได้มากกว่าหนึ่งย่านความถี่ขึ้นไป เช่น ย่านความถี่ VHF และ UHF ถูกออกแบบให้มีเครื่องรับและเครื่องส่งในตัวเดียวกัน (Transceiver) เพื่อสะดวกในการนำไปใช้งานสนับสนุนภารกิจต่าง ๆ ทั้งที่เป็น Primary และ Backup วิทยุประเภทนี้จะมีราคาสูงกว่าทั้ง ๒ แบบที่กล่าวมา เนื่องจากวงจรภายในมีความสลับซับซ้อนมากกว่า ทำให้การติดตั้งและซ่อมบำรุงยุ่งยากกว่า ๒ แบบที่กล่าวมา ปัจจุบันวิทยุประเภทนี้ถูกออกแบบให้สามารถใช้งานหลากหลายภารกิจ (Multi Roles) ได้ด้วย



PAE3060



M3SR

#### รูปภาพที่ ๓ - ๔ วิทยุควบคุมการบินแบบ Multi Channel-Multi Band-Multi Mode

วิทยุควบคุมการบินประเภทที่ ทอ.มีใช้งานอยู่ ได้แก่ แบบ PAE3060 ในโครงการ RTADS Phase III และตามโครงการ RTADS Phase II แบบ M3SR ของบริษัท Rohde & Schwarz ประเทศเยอรมนี ตามรูปภาพที่ ๓.๔ เครื่องวิทยุทั้ง ๒ แบบสามารถทำงานได้หลากหลายภารกิจ เช่น แบบ PAE3060 เป็นวิทยุ VHF/UHF/AM/FM ความถี่ 100 - 163 MHz และ 225 - 399.975 MHz ส่วน แบบ M3SR สามารถใช้งานได้ตั้งแต่ความถี่ 30 - 512 MHz ทั้งแบบ AM/FM ทั้งนี้วิทยุทั้ง ๒ แบบ สามารถเพิ่ม Option ใช้งานในระบบ Data Link และทำงานในระบบ Have Quick ได้ โดยเฉพาะ M3SR ยังมีขีดความสามารถเชื่อมต่อในแบบ IP ได้โดยตรง มีระบบ Security ที่ผู้ใช้งานสามารถเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในการโปรแกรมได้ด้วยตัวเอง เรียกว่า SECOS (Security Communication System)

#### ๓.๒.๓ การคำนวณหาระยะทางการติดต่อสื่อสารของระบบวิทยุควบคุมการบิน

เนื่องจากการแพร่กระจายคลื่นของย่านความถี่ตั้งแต่ 100 MHz ขึ้นไป เป็นแบบ “Line of Sight” หรือการสื่อสารในแนวสายตา ดังนั้น การคำนวณหาระยะทางจึงสามารถคำนวณได้ ๓ วิธีด้วยกัน คือ

๑. Optical Horizon Distance (OHD)
๒. Radio Horizon Distance (RHD)
๓. Scatter Distance (การคำนวณโดยวิธีนี้ไม่เป็นที่ยอมรับ เนื่องจากค่าที่ได้ไม่มี

ความแน่นอน จึงไม่เหมาะสมในการคำนวณเพื่อสนับสนุนภารกิจทางทหาร) จึงไม่ขอกล่าวเพิ่มเติม

**๓.๒.๓.๑ Optical Horizon Distance (OHD)** หมายถึงการคำนวณ ทหาระยะทางที่สามารถมองเห็นได้จากสายอากาศ (Antenna) เนื่องจากถูกจำกัดที่ความโค้งของโลก วิธีนี้ใช้ในการติดตั้งข่ายสื่อสารทางยุทธการ เพราะต้องการผลที่แน่นอน และมีความน่าเชื่อถือของข่ายสื่อสารสูง การคำนวณหาระยะทางในแนวสายตา (OHD) คำนวณได้จาก

$$D \text{ (Distance in Statute Mile)} = 1.227\sqrt{H} \quad (\text{Height in Feet})$$

ตัวอย่างที่ ๑ สายอากาศของสถานีวิทยุภาคพื้นมีความสูง ๑๐๐ ฟุต จงคำนวณหา OHD

$$\begin{aligned} \text{ระยะทางคำนวณได้ (D)} &= 1.227 \sqrt{10 \times 10} = 1.227 \times 10 \\ D &= 12.27 \text{ ไมล์} \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ ๒ เครื่องบินลำหนึ่งบินสูงที่ความสูง ๑๐,๐๐๐ ฟุต

$$\begin{aligned} \text{ระยะทางคำนวณได้ (D)} &= 1.227 \sqrt{100 \times 100} = 1.227 \times 100 \\ &= 122.7 \text{ ไมล์} \end{aligned}$$

จากตัวอย่างที่ ๑ และ ๒ ถ้า บ.บินที่ระดับความสูง ๑๐,๐๐๐ ฟุต และสายอากาศที่สถานีภาคพื้นมีความสูง ๑๐๐ ฟุต ดังนั้น ระยะทางในการติดต่อสื่อสารคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} D &= 1.227\sqrt{H_a} + \sqrt{H_g} \\ (\text{เมื่อ } H_a \text{ เป็นความสูงของ บ. และ } H_g \text{ เป็นความสูงสายอากาศสถานีภาคพื้น หน่วยเป็นฟุต)} \\ D &= 1.227 (\sqrt{10,000} + \sqrt{100}) = 1.227 \times (100+10) \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้น ระยะในการติดต่อสื่อสาร OHD = 1.227 X 110 = 134.97 ไมล์

**๓.๒.๓.๒ Radio Horizon Distance (RHD)** หมายถึงการคำนวณระยะทางติดต่อสื่อสารที่นำผลของการเกิด Refraction มาใช้ในการคำนวณ ระยะทางที่ได้จะเป็นระยะทางที่ไกลเกินกว่าการสื่อสารในแนวสายตาที่มองเห็นได้ สูตรในการคำนวณ RHD คือ

$$D \text{ (Distance in Statute Mile)} = \sqrt{2H} \quad (\text{Height in Feet})$$

ตัวอย่างที่ ๑ สายอากาศของสถานีวิทยุภาคพื้นมีความสูง ๑๐๐ ฟุต จงคำนวณหา RHD

$$\begin{aligned} \text{ระยะทางคำนวณได้ (D)} &= \sqrt{2 \times 100} = 1.414 \times 10 \\ D &= 14.14 \text{ ไมล์} \end{aligned}$$

จะเห็นว่าค่าที่คำนวณได้ของ RHD มีค่ามากกว่า OHD

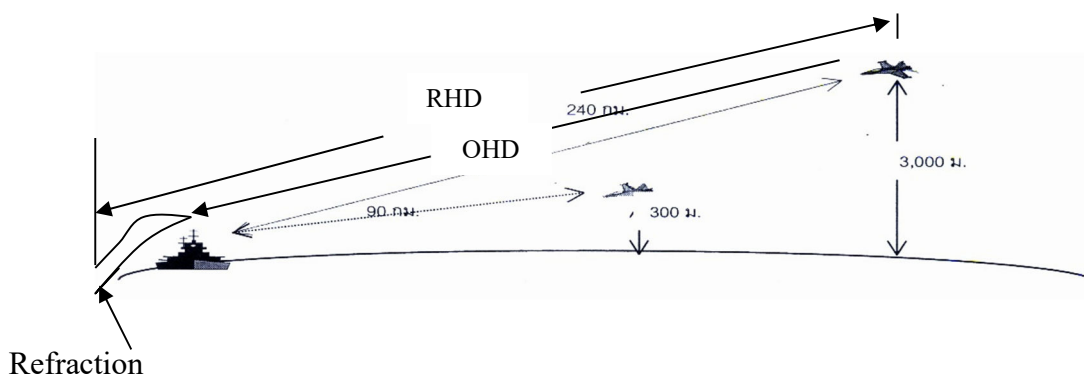
ตัวอย่าง จงคำนวณหาระยะทาง RHD ของ บ.บินที่ระดับความสูง ๑๐,๐๐๐ ฟุต และสายอากาศที่สถานีภาคพื้นมีความสูง ๑๐๐ ฟุต

$$\text{สูตร } D = \sqrt{2Ha} + \sqrt{2Hg}$$

(เมื่อ Ha เป็นความสูงของ บ. และ Hg เป็นความสูงสายอากาศสถานีภาคพื้น หน่วยเป็นฟุต)

$$\text{แทนค่า } D = \sqrt{2 \times 10,000} + \sqrt{2 \times 100} = 141.4 + 14.14$$

เพราะฉะนั้น ระยะในการติดต่อสื่อสาร RHD = 155.54 ไมล์



รูปภาพที่ ๓ - ๕ แสดงระยะทางติดต่อสื่อสารในแบบ OHD และ RHD

อย่างไรก็ดี ในการคำนวณเพื่อหาระยะทางในระบบวิทยุพื้นดิน อากาศ-พื้นดิน VHF/UHF ยังคงมีปัจจัยอื่นที่สำคัญ เพื่อใช้ในการคำนวณหาระยะทางที่แท้จริง ได้แก่ ประสิทธิภาพของการแพร่กระจายคลื่น (EIRP : Effective Isotropic Radiated Power) เช่น กำลังของเครื่องส่ง เภทซ์ของสายอากาศ ค่าสูญเสียในสายส่งกำลังและประสิทธิภาพของภาครับ เช่น เภทซ์สายอากาศ ค่าสูญเสียในสายส่งกำลัง ความไวของเครื่องรับ เป็นต้น นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงความถี่ใช้งาน ค่าสูญเสียในการเดินทางของคลื่น (Free Space Loss) การหาระยะทางที่แท้จริง จำเป็นต้องนำค่าเหล่านี้มาใช้ในการคำนวณด้วย การคำนวณหา OHD และ RHD จึงเป็นค่าที่ช่วยให้ผู้ใช้งานได้ทราบว่า หากต้องการติดตั้งสถานีภาคพื้นความสูงของสายอากาศ ควรมีค่าอยู่ที่ระยะสูงกี่ฟุต เพื่อใช้สนับสนุนภารกิจการบินที่ระยะความสูงนั้น ๆ ให้มีประสิทธิภาพ

สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่น (EIRP : Effective Isotropic Radiated Power) หาได้จาก

$$\text{EIRP} = P_t - LL_t + G_t \quad \text{หน่วยเป็น dBW}$$

เมื่อ  $P_t$  = Transmit Power in dBW

$LL_t$  = Total Line Loss at the Transmit End in dB

$G_t$  = Gain of Transmit Antenna in dBi

สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบส่ง (ETP:Effective Transmitted Power)

$$\text{ETP} = P_t - LL_t + G_t + G_r - LL_r \quad \text{หน่วยเป็น dBW}$$

เมื่อ  $P_t$  = Transmit Power in dBW

$LL_t$  = Total Line Loss at the Transmit End in dB

$G_t$  = Gain of Transmit Antenna in dBi

$LL_r$  = Total Line Loss at the Receive End in dB

$G_r$  = Gain of Receive Antenna in dBi

ทั้งนี้คำตอบที่ได้จะมีหน่วยเป็น dBW

เช่น สถานีติดตั้งวิทยุควบคุมการบินภาคพื้น ของ กองบิน ๑ เครื่องส่ง มีกำลังส่ง 10 วัตต์ หรือ 10 dBW ค่าสูญเสียในสายส่งทั้งด้านรับและส่งเท่ากับ 2 dB เหนือสายอากาศด้านส่ง 2 dB และเหนือสายอากาศด้านรับ 1 dB จงคำนวณหา EIRP และ ETP

$$ETP = P_t - LL_t + G_t + G_r - LL_r \text{ แทนค่า } 10 - 2 + 2 + 1 - 2$$

ค่า  $ETP = 9 \text{ dBW}$

$$EIRP = P_t - LL_t + G_t \text{ แทนค่า } 10 - 2 + 2 ;$$

ค่า  $EIRP = 10 \text{ dBW}$

ทั้งนี้ สมการที่คำนวณจากตัวอย่างทั้งสอง เป็นค่าที่ตั้งอยู่บนสมมุติฐานว่าค่า SWR ระหว่างสายส่งกำลัง (Transmission Line) กับสายอากาศ (Antenna) มี Impedance Match กัน

### ๓.๓ ระบบวิทยุ SINGLE SIDEBAND (SSB)

แต่เดิมเครื่องวิทยุแบบ SSB ที่ ทอ.ใช้งานมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการรวบรวมข่าวสารและทำหน้าที่กระจายข่าวสารระยะปานกลางถึงไกล ในขณะที่เทคโนโลยีในสมัยก่อนยังไม่แพร่หลายและเจริญเท่ากับหลายปีที่ผ่านมา การติดต่อสื่อสารด้วยวิทยุ SSB สามารถตอบสนองภารกิจทางทหารได้ดีต่อมาเมื่อเทคโนโลยีได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ระบบโทรคมนาคมพื้นฐานถูกวงจรรอบคลุมพื้นที่ที่หน่วยทางทหารเข้าไปปฏิบัติการ การรวบรวมข้อมูลและกระจายข่าวสารสามารถผ่านอุปกรณ์สื่อสารประเภทอื่นได้รวดเร็วและแม่นยำกว่า เช่น ระบบโทรศัพท์ แฟกซ์ ไมโครเวฟ และดาวเทียม

อย่างไรก็ตามวิทยุ SSB ก็ยังคงเป็นระบบที่มีความสำคัญสำหรับหน่วยงานทางทหารอยู่ เนื่องจากระบบอื่น ๆ ต่างต้องพึ่งพาเครือข่าย หรือ Media ในการติดต่อสื่อสาร กรณีที่เครือข่ายหรือ Media ขัดข้อง ก็จะส่งผลกระทบต่อการทำงานไปด้วย ดังนั้น วิทยุ SSB จึงเป็นระบบสื่อสารที่เป็นทางเลือกหนึ่งที่หน่วยทางทหารยังคงสามารถใช้ติดต่อข่าวสารเพื่อสนับสนุนภารกิจได้อยู่

กองทัพสหรัฐ ฯ ได้อาศัยข้อดีจากคุณสมบัติของคลื่นความถี่ในย่าน HF และสร้างระบบแลกเปลี่ยนข่าวสารทางยุทธวิธี (Data Link) ทำให้กองทัพสหรัฐ ฯ สามารถเพิ่มศักยภาพในการรบและนำมาซึ่งชัยชนะเหนือฝ่ายข้าศึกได้ ปัจจุบัน ทอ.ไทยได้นำระบบวิทยุ HF/SSB มาใช้งานใน ๒ ภารกิจใหญ่ ๆ คือ

๑. ติดต่อสื่อสารในระบบเสียงระหว่างหน่วยต่อหน่วย (Voice Mode)

๒. ใช้เป็นระบบแลกเปลี่ยนข้อมูลข่าวสารทางยุทธวิธี (Data Link) ซึ่งเป็นการนำข้อมูลจากระบบต่าง ๆ ทางยุทธวิธีมาบูรณาการในรูปแบบ Network ทำการประมวลผลแล้วแลกเปลี่ยนข้อมูลข่าวสารทางยุทธวิธีในระหว่างฝ่ายเดียวกัน เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลในการตัดสินใจ เป็นการเพิ่มความสามารถและประสิทธิภาพในการรบ อันเป็นหัวใจสำคัญของภารกิจทางทหาร



TMR 90'S HF Mackay Radio



AN/URC-94

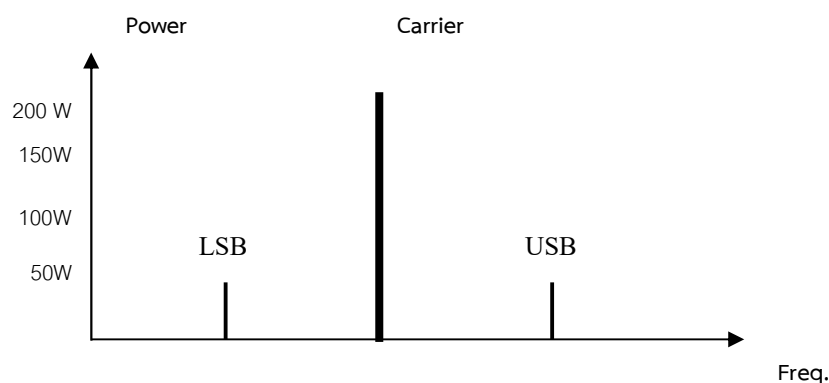


XK2100

รูปภาพที่ ๓ - ๖ เครื่องวิทยุซิงเกิลไซด์แบนด์ที่มีใช้งานในกองทัพอากาศ

### ๓.๓.๑ การคำนวณหาค่ากำลังส่งของวิทยุ SSB

ในระบบ AM มีค่าของ Power ที่พิจารณาอยู่ 2 ค่า คือค่าของ Carrier Power (PC) และค่า Peak Power สำหรับ Carrier Power คือค่าเฉลี่ยของคลื่นพาห์ที่ยังไม่มีการผสมคลื่นข่าวสาร (Unmodulated Carrier) ส่วนค่า Peak Power เป็นค่า Power ที่เกิดจากกำลังส่งของคลื่นพาห์ ผสมรวมกับกำลังงานของคลื่นข่าวสารใน Sideband ทั้ง 2 ข้าง ในระบบการส่งแบบ AM นั้นเราคิดค่า Power เป็นค่ากำลังงานเฉลี่ย (Average Power) แต่ในการส่งแบบ SSB คิดเป็นค่า Peak Envelope Power (PEP)



รูปภาพที่ ๓ - ๗ การเปรียบเทียบกำลังส่งของ SSB กับ AM

จากตัวอย่าง เป็นการคำนวณค่ากำลังงานขณะที่เครื่องส่งทำการออกอากาศด้วยสัญญาณ Mod 100% โดยมีค่าแรงไฟอยู่ที่ 100 Volts ค่า Radiation Resistance (Ant) เท่ากับ 50 โอห์ม จึงคำนวณหาค่ากำลังงานของคลื่นพาห์ (Power Carrier : Pc)

$$\text{สูตร } P_c = E^2/R$$

เมื่อ  $E = 100 \text{ Volts}$  และ  $R = 50 \text{ โอห์ม}$

$$\text{แทนค่า} = (100)^2/50$$

$$\text{ดังนั้น } P_c = 200 \text{ Watts}$$

สำหรับการหาค่ากำลังงานรวม (Total Power :  $P_t$ ) เมื่อ Mod 100% สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{สูตร } P_t = P_c \left( 1 + \frac{M^2}{2} \right)$$

เมื่อ  $P_t = \text{Total Power}$

$P_c = \text{Carrier Power}$

$M = \text{Modulation Index (100\% Mod = 1)}$

$$\text{แทนค่า } P_t = \frac{200 (1 + 1^2)}{2}$$

$$\text{ดังนั้น } P_t = 200 \times 1.5 = 300 \text{ W}$$

สำหรับการหาค่ากำลังงานใน Sideband สามารถหาได้จากการนำค่ากำลังงานรวมลบด้วยค่ากำลังงานของคลื่นพาห์ หรือเขียนเป็นสมการดังนี้

$$P_{sb} = P_t - P_c$$

เมื่อนำค่าที่หาได้จากตัวอย่างข้างต้น จึงสามารถคำนวณค่ากำลังงานใน Sideband ทั้งสองข้างรวมกันจะมีค่าเท่ากับ  $300 - 200 = 100 \text{ W}$  ดังนั้นกำลังงานในแต่ละ Sideband จึงมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของกำลังงานใน Sideband ทั้งสองข้าง คือ  $50 \text{ W}$  จะเห็นได้ว่า Power ในแต่ละ Sideband เป็น  $\frac{1}{4}$  เท่าของ Power ที่ Carrier Mod 100%

เครื่องส่งในระบบ SSB จะให้กำลังส่งสูงกว่า AM ประมาณ 4 เท่า คิดเป็น  $\text{dB} = 9 \text{ dB}$  กรณีที่ผสมคลื่นแบบ 100% เครื่องส่ง AM และเครื่องส่ง SSB สิ้นเปลืองกำลังที่เท่ากัน

อย่างไรก็ดีเราสามารถคำนวณหาค่า PEP ได้จากการนำค่าแรงดันสูงสุด ( $E_{\text{max}}$  or  $E_{\text{peak}}$ ) คูณด้วย 0.707 แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้มายกกำลัง ๒หารด้วยค่า Load Resistance ตัวอย่างเช่น วิทยุ SSB ป้อนแรงไฟขนาด  $150 \text{ Vp-p}$  ให้กับโหลด  $50 \text{ โอห์ม}$  จงหาค่าของ PEP

$$\text{PEP} = [(150/2) \times 0.707]^2 / 50 = 56.2 \text{ W.}$$

### ๓.๓.๑.๑ แบบต่าง ๆ ในระบบ SSB

๑. SSB Transmission หมายถึง การส่งคลื่นวิทยุที่ส่งเฉพาะ Sideband ออกไปเพียงด้านเดียว ส่วนสัญญาณ Carrier และ Sideband อีกด้านหนึ่งถูกตัดออกไป นิยมใช้ในระบบ SSB ทั่ว ๆ ไป

๒. SSB Suppressed Carrier หมายถึง การส่งคลื่นวิทยุที่ส่งเฉพาะ Sideband ออกไปเพียงด้านเดียว กับสัญญาณ Carrier บางส่วน ซึ่งบางครั้งเรียกว่า "Pilot Carrier" สำหรับ Sideband อีกด้านหนึ่งจะถูกตัดออกไป

๓. SSB Reduced Carrier หมายถึง การส่งคลื่นวิทยุที่ส่งเฉพาะ Sideband ออกไปเพียงด้านเดียว กับสัญญาณ Carrier ที่ถูกลดขนาดลง และ Sideband อีกด้านหนึ่งถูกตัดออกไป

๔. SSB Full Carrier หมายถึง การส่งคลื่นวิทยุที่ส่งสัญญาณ Carrier กับ Sideband ด้านหนึ่งออกไปส่วนอีก Sideband หนึ่งถูกตัดทิ้ง

๕. Independent Sideband หมายถึง การส่งคลื่นวิทยุที่สัญญาณ Carrier จะถูกตัดออก ส่งแต่เฉพาะ Sideband ทั้งสองข้างออกไป ซึ่งแต่ละข้างจะบรรจุข่าวสารไว้ไม่เหมือนกัน

### ๓.๓.๑.๒ สรุปข้อเปรียบเทียบระหว่างระบบ AM กับระบบ SSB ทั่วไป

#### ข้อดีของ SSB

- ในหนึ่งความถี่ใช้งาน SSB จะใช้ความกว้างของ Band ในการส่งน้อยกว่า AM จึงทำให้สามารถใช้งานได้ถึง 2 Channels (LSB or USB) ขณะที่เครื่องส่ง AM ใช้ได้เพียง Channel เดียว

- ในสถานภาพเดียวกันเครื่องส่ง SSB จะใช้กำลังส่งน้อยกว่าเครื่องส่ง AM ถึง ๔ เท่า (9 dB)

- เปรียบเทียบ Signal - to - Noise Ratio ในสภาวะปกติคือการแพร่กระจายคลื่นผ่านชั้นบรรยากาศ คุณภาพในการรับคลื่นของระบบ AM และ SSB จะมีคุณภาพเท่าเทียมกัน แต่ถ้าอยู่ในสภาพของอากาศที่เลวลง ระบบ SSB จะมีคุณภาพทางการรับดีกว่า AM ถึง 9 dB

- ความคงทนของสัญญาณต่อการจางหายของคลื่นวิทยุ (Fading) และการรบกวน (Interference) ระบบ SSB จะมีสภาพดีกว่าของระบบ AM เนื่องจากในการส่งระบบ AM มีปัญหาจากการหักล้างของสัญญาณระหว่าง LSB กับ USB ในสภาวะที่สภาพอากาศเกิดการเปลี่ยนแปลง

- เนื่องจากระบบ SSB ต้องการกำลังไฟน้อยกว่าระบบ AM เมื่อต้องการกำลังงานระดับเดียวกัน จึงทำให้การออกแบบระบบ SSB มีขนาดและน้ำหนักน้อยกว่าระบบ AM

#### ข้อเสียของ SSB

- ระบบ SSB ต้องการความแน่นอนของความถี่ (Frequency Stability) สูง เพื่อใช้ในระบบ ฉะนั้นการปรับแต่งต่าง ๆ ของระบบจึงยุ่งยาก และเป็นสาเหตุให้การออกแบบวงจรในระบบ SSB มีความซับซ้อนมาก

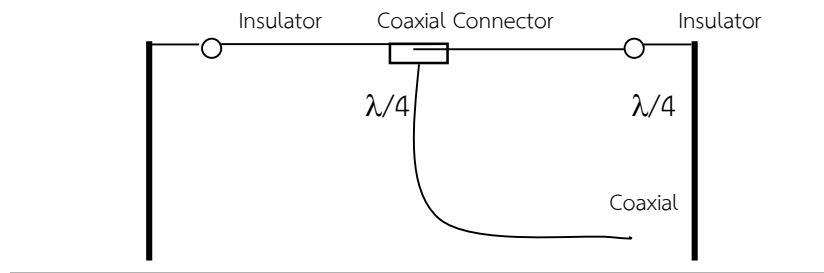
- เนื่องจากความยุ่งยากและซับซ้อนของระบบ จึงทำให้เครื่องมีราคาแพง

### ๓.๓.๒ แบบต่าง ๆ ของสายอากาศวิทยุ SSB

๓.๓.๒.๑ Half wave Dipole เป็นสายอากาศที่ใช้เฉพาะความถี่ใดความถี่หนึ่ง ความยาวของสายอากาศเท่ากับ  $\frac{1}{2}$  ของความยาวคลื่น โดยมุมของการแพร่กระจายคลื่นจะขึ้นอยู่กับความสูงของสายอากาศ และทิศทางการแพร่กระจายคลื่นขึ้นอยู่กับทิศทางการติดตั้งของสายอากาศ

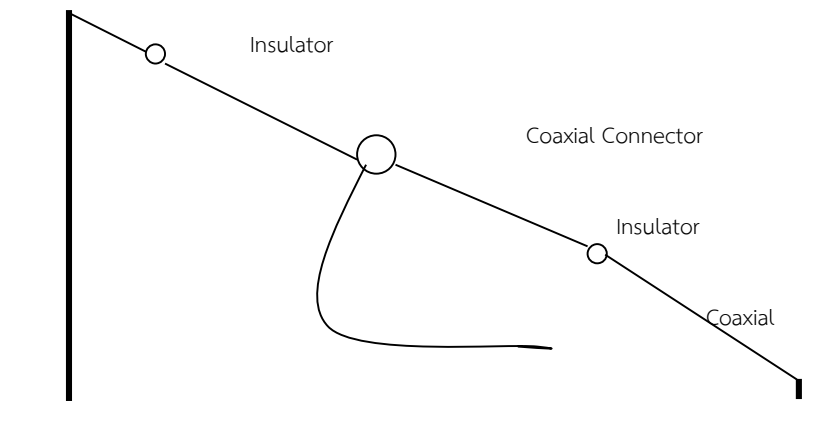


**๓.๓.๒.๑.๑ Horizontal** เป็นสายอากาศที่ติดตั้งใช้งานในการติดต่อสื่อสารระหว่างจุดต่อจุด พื้นที่ในการติดตั้งขึ้นอยู่กับความยาวของสายอากาศ (คำนวณจากความถี่ใช้งาน)



รูปภาพที่ ๓ - ๘ Horizontal Half Wave Dipole Antenna

**๓.๓.๒.๑.๒ Slant Doublet** เป็นสายอากาศ Half Wave ชนิดหนึ่ง ถูกใช้ในการติดตั้งในบริเวณที่มีพื้นที่จำกัดและต้องการปรับมุมของการแพร่กระจายคลื่นให้มีทิศทางตามต้องการ

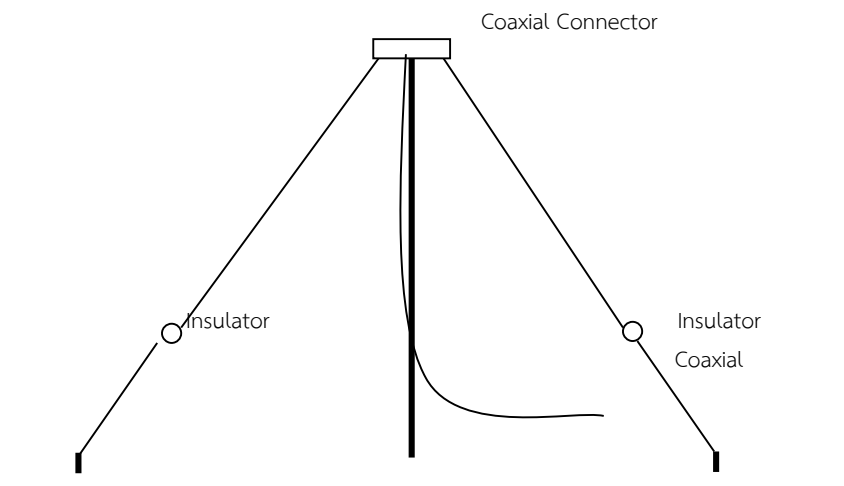


รูปภาพที่ ๓ - ๙ Slant Doublet Half Wave Dipole Antenna

ความยาวของสายอากาศแบบ Horizontal และ Slant Doublet Half Wave Dipole Antenna คำนวณได้จากสูตรดังนี้

- ๑.  $234/\text{Freq (MHz)}$  ความถี่ใช้งาน หน่วย ฟุต
- ๒.  $71.3/\text{Freq (MHz)}$  ความถี่ใช้งาน หน่วย เมตร

**๓.๓.๒.๑.๓ Inverted VEE Doublet Half Wave Dipole Antenna** หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Drooping Half Wave Antenna เหมาะสำหรับใช้งานในบริเวณพื้นที่ลาดเอียงและบริเวณจำกัด แพร่กระจายคลื่นทั้งในแบบ Horizontal และ Vertical

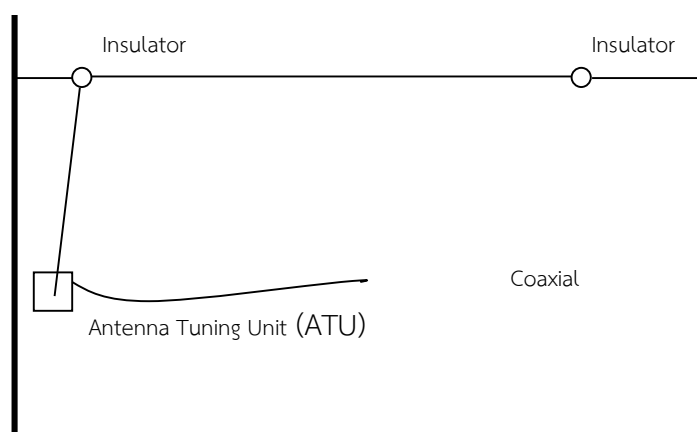


รูปภาพที่ ๓ - ๑๐ Inverted VEE Doublet Half Wave Dipole Antenna

สูตรการหาความยาวของสายอากาศแบบ Invert VEE Doublet

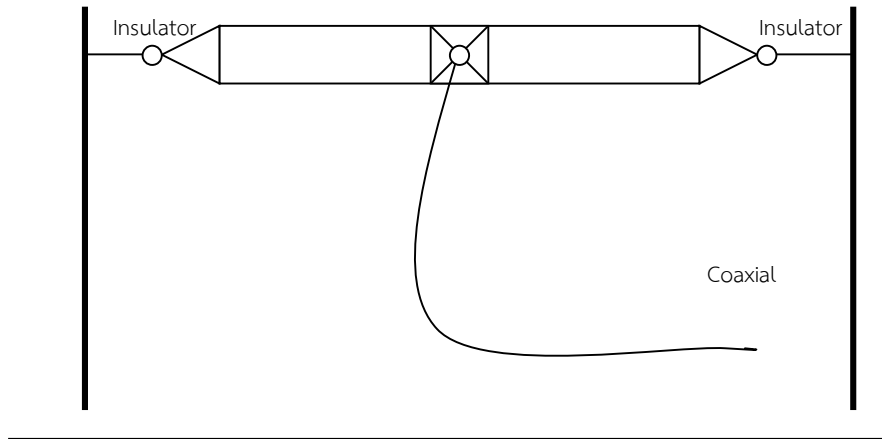
1.  $245/\text{Freq (MHz)}$  ความถี่ใช้งาน หน่วย ฟุต
2.  $74.5/\text{Freq (MHz)}$  ความถี่ใช้งาน หน่วย เมตร

**๓.๓.๒.๒ Long Wire Antenna** เป็นสายอากาศที่ต้องใช้ร่วมกับ Antenna Tuning Unit (ATU) หรือ Antenna Coupler Unit (ACU) เพื่อเป็นตัวปรับแต่งความยาวทางไฟฟ้าของสายอากาศให้สามารถใช้งานได้ตลอดย่านความถี่ 2 - 30 MHz การแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบ Vertical Polarization ระยะใกล้ใช้ติดต่อที่ความถี่ต่ำเนื่องจากมุมแพร่กระจายคลื่นสูง และใช้ติดต่อระยะไกลที่ความถี่สูงเนื่องจากมุมในการแพร่กระจายคลื่นต่ำ หรืออาจกล่าวได้ว่ามุมของการแพร่กระจายคลื่นและเกณฑ์การขยายจะขึ้นอยู่กับความยาวสายอากาศ ปกติติดตั้งสูงจากระดับพื้น ๑๕ - ๒๐ ฟุต



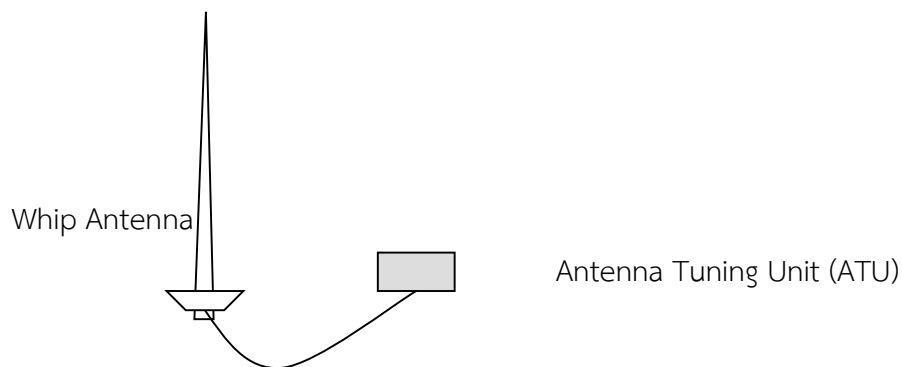
รูปภาพที่ ๓ - ๑๑ Long Wire Antenna

**๓.๓.๒.๓ Broadband Dipole** เป็นสายอากาศที่สามารถใช้งานได้ตลอดย่านความถี่ คือ 2 - 30 MHz โดยไม่ต้องใช้งานร่วมกับ Antenna Tuning Unit จึงเหมาะกับการใช้งานที่มีการปรับเปลี่ยนความถี่อยู่บ่อย ๆ สายอากาศประเภทนี้ต้องการพื้นที่ในการติดตั้งพอสมควร



รูปภาพที่ ๓ - ๑๒ Broadband Dipole Antenna

**๓.๓.๒.๔ Vertical Whip Antenna** เป็นสายอากาศที่ติดตั้งในแนวตั้ง ต้องใช้ร่วมกับ Antenna Tuning Unit (ATU) หรือ Antenna Coupler Unit (ACU) เพื่อเป็นตัวปรับแต่งความยาวทางไฟฟ้าของสายอากาศให้สามารถใช้งานได้ตลอดย่านความถี่ 2-30 MHz มีการแพร่กระจายคลื่นเป็นมุมต่ำ สามารถติดต่อระยะไกลโดยใช้ Sky Wave การติดต่อระยะใกล้โดยใช้ Ground Wave เหมาะสำหรับใช้งานยุทธวิธีโดยการติดตั้งบนรถยนต์ การแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบ Omni-Directional



รูปภาพที่ ๓ - ๑๓ Vertical Whip Antenna

### ๓.๓.๓ วิทย์ SSB ที่มีใช้งานใน ทอ.

ปัจจุบันมีเครื่องวิทย์ HF/SSB ที่ ทอ.ใช้งานอยู่หลายแบบด้วยกัน ได้แก่ RF-2301, AN/URC-94 หรือ RF-280, TMR 90'S, HF6200 และ PRC-130 เป็นต้น และกำลังติดตั้งใช้งานในโครงการป้องกันทางอากาศภาคเหนือ (RTADS PHASE II) คือ XK2100 ที่ สถานีรายงานภูหมื่นขาวและสถานีรายงานเขาใหญ่

### คุณลักษณะของวิทย์ HF/SSB ที่มีใช้งานใน ทอ.

เป็นเครื่องรับ-ส่งวิทย์ที่มีคุณลักษณะทางเทคนิคสูง เป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในกิจการทางทหารการติดต่อสื่อสารเป็นแบบ Two-way Communication ใช้ได้หลาย Mode เช่น USB, LSB, FM, AM และ CW โดยมีความถี่ตั้งแต่ 1.5 ถึง 30 MHz บางแบบสามารถใช้งานได้จนถึง 79.999 MHz อาจมีการใช้งานร่วมกับชุด Antenna Coupler Unit หรือ Antenna Tuning Unit เพื่อใช้ปรับความยาวทางไฟฟ้าให้กับสายอากาศให้ Match กับความถี่ใช้งานโดยอัตโนมัติ สามารถเปลี่ยนความถี่ ออกอากาศได้ภายในระยะเวลาที่รวดเร็ว

กำลังส่งออกอากาศโดยเฉลี่ยของระบบ Voice/Data อยู่ระหว่าง ๑๐๐ - ๑๒๕ วัตต์ แต่หากต้องการส่งสัญญาณในรูปแบบของ Data ให้ครอบคลุมพื้นที่ในการรับ-ส่งได้ทั่วประเทศ ต้องใช้กำลังส่งโดยเฉลี่ยไม่น้อยกว่า ๔๐๐ วัตต์

## ๓.๔ ระบบสื่อสารยุทธวิธี (Tactical Communication System)

### ๓.๔.๑ กล่าวทั่วไป

ระบบสื่อสารยุทธวิธีเป็นระบบสื่อสารที่กองทัพอากาศได้จัดไว้เพื่อใช้ในการติดต่อสื่อสารระหว่างหน่วยงานทางยุทธวิธีด้วยกันเองและหน่วยสนับสนุนทางยุทธวิธีอื่น ๆ ทั้งในเหล่าทัพเดียวกันและต่างเหล่าทัพหรือระหว่างเหล่าทัพและหน่วยงานความมั่นคงภายในและนอกประเทศ สำหรับกองทัพอากาศ ระบบสื่อสารยุทธวิธีถูกนำมาใช้ในภารกิจทางทหาร ดังนี้

๑. ภารกิจควบคุมและสั่งการ เพื่อใช้ในการควบคุมจากส่วนควบคุมไปยังหน่วยปฏิบัติ
๒. ภารกิจป้องกันฐานบินหรือป้องกันทางอากาศ เพื่อใช้ในการป้องกันหน่วยที่ตั้งทางทหาร
๓. ภารกิจสนับสนุนทางยุทธวิธี ได้แก่ การฝึกร่วม/ร่วมผสม การส่งกำลังบำรุง รวมทั้งการสนับสนุนภารกิจอื่นที่มีใช้ทางทหาร เช่น ประเทศเกิดภัยพิบัติ หรือ สถานการณ์ฉุกเฉิน เป็นต้น

### ๓.๔.๒ ย่านความถี่วิทย์ที่ใช้งานในระบบสื่อสารยุทธวิธี แบ่งออกเป็น 3 ย่านความถี่ คือ

- ย่านความถี่ HF (High Frequency)
- ย่านความถี่ VHF (Very High Frequency)
- ย่านความถี่ UHF (Ultra High Frequency)3

### ๓.๔.๒.๑ ย่านความถี่ HF/SSB (High Frequency)

High Frequency จะกำหนดย่านความถี่ใช้งานไว้ที่ 2 - 30 MHz ในระบบสื่อสารวิทยุวิธี ย่านความถี่ HF นี้จะถูกใช้งานทั้งแบบที่เป็น Manpack, Mobile หรือ Vehicle และแบบ Base Station ลักษณะการแพร่กระจายคลื่นจะส่งคลื่นขึ้นไปบนชั้นบรรยากาศแล้วสะท้อนกลับลงมายังพื้นโลก กำลังส่งออกอากาศของเครื่องส่งจะมีตั้งแต่ประมาณ 20 Watts จนถึง 1,000 Watts ขึ้นอยู่กับรูปแบบของการใช้งาน ย่านความถี่ HF มีประโยชน์ในเรื่องระยะทางในการติดต่อ ซึ่งสามารถติดต่อใช้งานได้ในระยะทางปานกลางถึงไกล ปัจจุบัน ทอ.มีวิทยุที่ใช้งานย่านความถี่ HF ได้แก่ AN/PRC-104, AN/PRC-174, AN/PRC-130, AN/URC-94, RF-2301, และวิทยุ HF6200 เป็นต้น



AN/PRC-130

รูปภาพที่ ๓ - ๑๔ เครื่องวิทยุที่ใช้งานย่านความถี่ HF

### ๓.๔.๒.๒ ย่านความถี่ VHF (Very High Frequency)

สำหรับในทางทหารแล้วย่านความถี่ VHF จะแบ่งออกเป็น VHF/FM (Low Band) และ VHF/AM โดยปกติ VHF/FM (Low Band) กำหนดย่านความถี่ใช้งานที่ 30 - 75.975 MHz และ VHF/AM จะกำหนดย่านความถี่ใช้งานไว้ที่ 116 - 149.975 MHz ย่านความถี่นี้การแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบ Line-of-Sight ซึ่งมีประโยชน์ในการติดต่อสื่อสารระหว่างจุดต่อจุด สถานีภาคพื้นกับอากาศยาน และระหว่างสถานีภาคพื้นกับชุดปฏิบัติการเคลื่อนที่ แต่การสื่อสารจะถูกจำกัดระยะทางด้วยลักษณะของภูมิประเทศ ปัจจุบัน ทอ.มีวิทยุที่ใช้งานในระบบสื่อสารวิทยุวิธีย่านความถี่ VHF/FM (Low Band) ได้แก่ AN/PRC-77, AN/PRC-117(D), AN/GRC-160, RT-524A, AN/GRC-125, PRC-710S, CNR900 และเป็นทั้ง VHF/UHF/AM คือ AN/PRC-113 และ AN/VRC-83 นอกจากนี้ยังที่เป็นทั้ง VHF/UHF/AM/FM คือ และ PRC-710MB เป็นต้น

### ๓.๔.๒.๓ ย่านความถี่ UHF (Ultra High Frequency)

ย่านความถี่นี้ทางทหารกำหนดไว้ตั้งแต่ 225 - 399.975 MHz การ Modulation จะเป็นแบบ Amplitude Modulation การแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบ Line-of-Sight ซึ่งมีประโยชน์ในการติดต่อสื่อสารระหว่างจุดต่อจุด สถานีภาคพื้นกับอากาศยาน อากาศยานกับอากาศยาน และระหว่างสถานีภาคพื้นกับชุดปฏิบัติการเคลื่อนที่ แต่การสื่อสารจะถูกจำกัดระยะทางด้วยลักษณะของภูมิประเทศ กำลังส่งออกอากาศของเครื่องส่งประมาณ 2 - 30 Watts ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปแบบของการใช้งาน ปัจจุบัน ทอ. มีวิทยุที่ใช้งานในระบบสื่อสารวิทยุวิธีย่านความถี่ UHF ได้แก่ AN/PRC-660 และ AN/VRC-240

และเป็นทั้ง VHF/UHF/AM คือ AN/PRC-113 และ AN/VRC-83 นอกจากนี้ยังที่เป็นทั้ง VHF/UHF/AM/FM คือ AN/URC-200 และ PRC-710MB เป็นต้น



AN/PRC-77



AN/PRC-1077



AN/PRC-113

### รูปภาพที่ ๓ - ๑๕ เครื่องวิทยุที่ใช้งานย่านความถี่ VHF



AN/URC-200



AN/PRC-710MB

### รูปภาพที่ ๓ - ๑๖ เครื่องวิทยุที่ใช้งานย่านความถี่ UHF

#### ๓.๔.๓ ระบบวิทยุสื่อสารยุทธวิธีที่ใช้งานในกองทัพอากาศมี 3 รูปแบบคือ

๑. วิทยุ Manpack
๒. วิทยุ Mobile หรือ Vehicle
๓. วิทยุ Base Station

##### ๓.๔.๓.๑ วิทยุ Manpack

วิทยุ Manpack เป็นวิทยุทางทหารที่ผู้ใช้งานสามารถนำติดตัวไปได้ทุก ๆ สถานการณ์ ดังนั้น วิทยุ Manpack จึงถูกออกแบบให้มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา มีกำลังส่งออกอากาศต่ำ

สิ้นเปลืองพลังงานน้อย เพื่อให้ใช้งานได้นานที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เนื่องจากพลังงานที่ใช้กับวิทยุ Manpack ได้จาก Battery

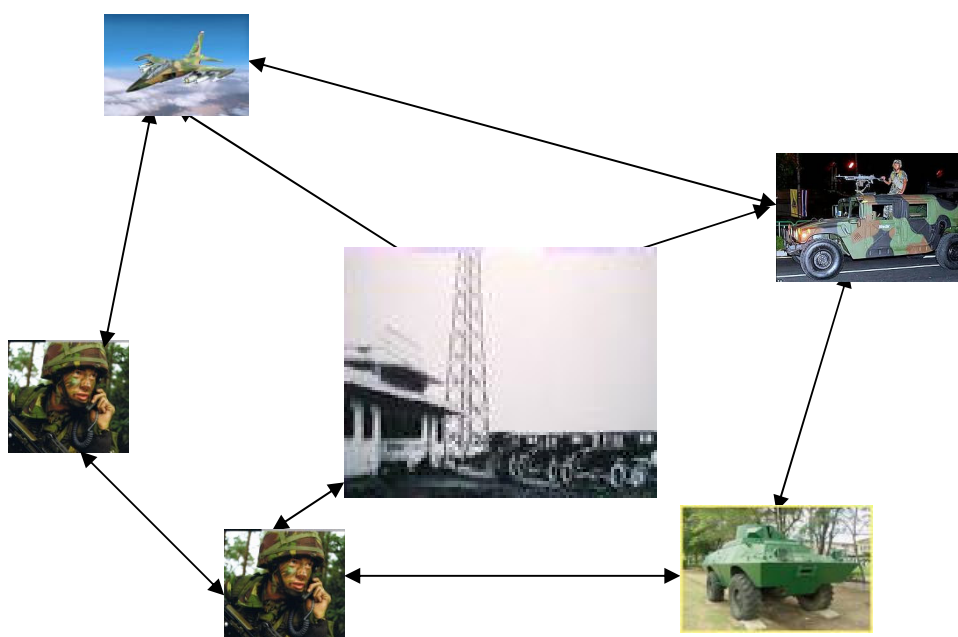
### ๓.๔.๓.๒ วิทยุ Mobile หรือ Vehicle

วิทยุ Mobile หรือ Vehicle เป็นวิทยุที่ออกแบบมาสำหรับติดตั้งบนยานพาหนะต่าง ๆ ดังนั้น วิทยุ Mobile หรือ Vehicle จึงถูกออกแบบให้มีขนาดที่พอเหมาะไม่เล็กหรือใหญ่เกินไป น้ำหนักพอประมาณ มีกำลังส่งออกอากาศปานกลางจนถึงสูง พลังงานที่ใช้ในระบบวิทยุ Mobile หรือ Vehicle มาจาก Battery ของยานพาหนะนั้น ๆ หรือ ย.ทำไฟ

### ๓.๔.๓.๓ วิทยุ Base Station

วิทยุ Base Station เป็นวิทยุที่ออกแบบสำหรับติดตั้งประจำที่ จึงไม่ต้องคำนึงถึงข้อจำกัดเหมือนกับทั้งสองแบบที่กล่าวมาข้างต้น โดยทั่วไปมีขนาดค่อนข้างใหญ่ น้ำหนักมาก ไม่เหมาะกับการเคลื่อนย้ายบ่อยๆ กำลังส่งออกอากาศสูงและสายอากาศมีขนาดใหญ่ เพื่อให้เกณฑ์การขยายสูงและติดต่อได้ระยะไกล พลังงานที่ใช้มาจากกระแสไฟฟ้า AC วิทยุ Base Station จะมีย่านความถี่ใช้งานครอบคลุมทุกย่านความถี่ คือ HF/SSB, VHF/FM (Low Band), VHF/FM (High Band), VHF/AM, UHF/AM ทั้งนี้เพื่อให้สามารถติดต่อใช้งานได้ครอบคลุมภารกิจของหน่วย

### ลักษณะการใช้งานของระบบสื่อสารวิทยุวิธี



รูปภาพที่ ๓ - ๑๗ การติดต่อสื่อสารในระบบสื่อสารวิทยุวิธี

## ๓.๕ วิทยุข่ายควบคุมและสั่งการ

### ๓.๕.๑ กล่าวทั่วไป

วิทยุข่ายควบคุมและสั่งการที่กองทัพอากาศไทยใช้งานอยู่ในปัจจุบัน เป็นวิทยุที่ทำงานอยู่ในย่าน VHF/FM High Band ความถี่ระหว่าง 136 - 174 MHz และ UHF/FM ความถี่ระหว่าง 400 - 460 MHz แพร่กระจายคลื่นในแบบ Line of Sight ติดต่อกันระหว่าง Ground to Ground ระยะการติดต่อสื่อสารขึ้นอยู่กับกำลังส่ง ค่าสูญเสียในสายส่งกำลัง เหนือของสายอากาศ ความสูงของสายอากาศ ความถี่ใช้งาน และลักษณะภูมิประเทศ ซึ่งสามารถคำนวณหาระยะทางได้จากสูตรดังนี้

$$40 \text{ Log } D = \text{ETP} - 107.7 - 20 \text{ Log } f + 20 \text{ Log } H_t + 20 \text{ Log } H_r - \text{Tfm} \quad \text{หน่วยเป็นไมล์}$$

$\text{ETP} = P_t - \text{LL}_t + G_t + G_r - \text{LL}_r$  หน่วยเป็น dBW

$\text{Tfm} = T_n + 10 \text{ dB}$  หน่วยเป็น dBW

$T_n = 20 \text{ Log } E - 10 \text{ Log } R$  (เมื่อ  $E = \text{Sensitivity in Volt}$ ,  $R = \text{Receiver input Resistance}$ )

$f = \text{ความถี่ใช้งานหน่วยเป็น MHz}$

$H_t = \text{ความสูงสายอากาศด้านส่ง หน่วยเป็นฟุต}$

$H_r = \text{ความสูงสายอากาศด้านรับ หน่วยเป็นฟุต}$

วิทยุดิจิทัลที่กองทัพอากาศไทยใช้ โดยทั่วไปแล้วเป็น ระบบการสื่อสารดิจิทัลทางทหาร ซึ่งเน้นที่ความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือในการสื่อสารระหว่างหน่วยงานและเครื่องบิน ระบบที่ใช้มีลักษณะเฉพาะเพื่อการปฏิบัติการทางทหารโดยเฉพาะ ไม่ใช่ระบบวิทยุแบบดิจิทัลสำหรับการกระจายเสียงทั่วไปเช่น DAB (Digital Audio Broadcasting)

#### ๓.๕.๑.๑ ระบบที่ใช้ในกองทัพอากาศไทยอาจประกอบด้วย

##### ๓.๕.๑.๑.๑ ระบบการสื่อสารทางวิทยุดิจิทัล (Digital Radio

Communication Systems)

- ใช้เทคโนโลยีการเข้ารหัสข้อมูลและการแพร่สัญญาณที่ปลอดภัย เพื่อป้องกันการถูกดักฟังหรือแทรกแซง
- รองรับการสื่อสารด้วยเสียง ข้อความ และข้อมูลอื่น ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

##### ๓.๕.๑.๑.๒ เทคโนโลยีการกระโดดความถี่ (Frequency Hopping)

- เป็นเทคโนโลยีที่ช่วยให้การสื่อสารมีความปลอดภัยมากขึ้นโดยการเปลี่ยนความถี่ในการส่งสัญญาณอย่างรวดเร็ว ทำให้ยากต่อการดักฟัง



### ๓.๕.๑.๑.๓ การสื่อสารด้วยการเข้ารหัส (Encryption)

- ข้อมูลเสียงและข้อมูลที่ส่งผ่านระบบวิทยุดิจิทัล มักจะถูกเข้ารหัส เพื่อป้องกันการเข้าถึงจากบุคคลภายนอกหรือฝ่ายตรงข้าม

### ๓.๕.๑.๑.๔ การสื่อสารแบบโครงข่ายเมช (Mesh Network Communication)

- ระบบนี้ช่วยให้การสื่อสารมีความยืดหยุ่นและเชื่อมต่อได้ แม้ในสภาพแวดล้อมที่มีความซับซ้อนโดยไม่ต้องพึ่งพาโครงข่ายการสื่อสารที่เป็นศูนย์กลาง ระบบวิทยุดิจิทัลที่ใช้ในกองทัพอากาศไทยเป็นระบบเฉพาะที่ออกแบบมาเพื่อการปฏิบัติการทางทหาร มีการป้องกันการดักฟังและมีความน่าเชื่อถือสูงในการสื่อสารระหว่างหน่วยงานต่าง ๆ ของกองทัพ

๓.๕.๑.๒ ระบบวิทยุดิจิทัล (Digital Radio) มีหลายแบบที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อตอบสนองความต้องการของการสื่อสารที่มีคุณภาพสูงขึ้น ความปลอดภัยที่ดีขึ้น และประสิทธิภาพในการใช้งานที่สูงขึ้น ระบบวิทยุดิจิทัลที่เป็นที่รู้จักและใช้งานกันทั่วไปมีดังนี้

#### ๓.๕.๑.๒.๑ Digital Mobile Radio (DMR)

มาตรฐาน เป็นมาตรฐานที่กำหนดโดย European Telecommunications Standards Institute (ETSI)

การใช้งาน ใช้ในหลายภาคส่วน เช่น การสื่อสารขององค์กร หน่วยงานภาครัฐ การขนส่ง และสถานที่ก่อสร้าง

คุณสมบัติ มีความสามารถในการจัดการช่องสัญญาณอย่างมีประสิทธิภาพ ใช้งานในระบบ Tier I, II, และ III ซึ่งมีความซับซ้อนแตกต่างกัน

#### ๓.๕.๑.๒.๒ Terrestrial Trunked Radio (TETRA)

มาตรฐาน เป็นมาตรฐานที่กำหนดโดย European Telecommunications Standards Institute (ETSI)

การใช้งาน ใช้ในหน่วยงานความปลอดภัยสาธารณะ เช่น ตำรวจ หน่วยดับเพลิง และการควบคุมการจราจรทางอากาศ

คุณสมบัติ รองรับการสื่อสารแบบกลุ่ม มีความปลอดภัยสูงและสามารถจัดการการใช้งานหลายคนพร้อมกัน

#### ๓.๕.๑.๒.๓ Project 25 (P25)

มาตรฐาน พัฒนาโดย Association of Public - Safety Communications Officials (APCO) ในสหรัฐอเมริกา

การใช้งาน ใช้ในองค์กรและหน่วยงานภาคเอกชน โดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมและการขนส่ง

**คุณสมบัติ** มีความสามารถในการสื่อสารแบบดิจิทัล และแบบแอนะล็อกพร้อมกัน รองรับการเข้ารหัสข้อมูล

#### ๓.๕.๑.๒.๔ NXDN

**มาตรฐาน** พัฒนาโดย ICOM และ KENWOOD  
**การใช้งาน** ใช้ในองค์กรและหน่วยงานภาคเอกชนโดยเฉพาะ ในภาคอุตสาหกรรมและการขนส่ง

**คุณสมบัติ** มีความสามารถในการสื่อสารแบบดิจิทัลและแบบแอนะล็อกพร้อมกัน รองรับการเข้ารหัสข้อมูล

#### ๓.๕.๑.๒.๕ DPMR (Digital Private Mobile Radio)

**มาตรฐาน** เป็นมาตรฐานที่กำหนดโดย ETSI  
**การใช้งาน** ใช้ในองค์กรและภาคเอกชนที่ต้องการ การสื่อสารที่มีความปลอดภัยและความชัดเจนของเสียง

**คุณสมบัติ** ระบบมีความยืดหยุ่นสูงในการใช้งาน รองรับการสื่อสารทั้งเสียงและข้อมูล

**๓.๕.๑.๒.๖ D-STAR (Digital Smart Technologies for Amateur Radio)**  
**มาตรฐาน** พัฒนาโดย Japan Amateur Radio League (JARL)

**การใช้งาน** ใช้ในกลุ่มวิทยุสมัครเล่น (Amateur Radio)  
**คุณสมบัติ** รองรับการสื่อสารผ่านอินเทอร์เน็ต การส่งข้อมูล และการใช้งานในระบบวิทยุสมัครเล่น

#### ๓.๕.๑.๒.๗ DAB (Digital Audio Broadcasting)

**มาตรฐาน** เป็นมาตรฐานสากลสำหรับการแพร่ภาพเสียงดิจิทัล

**การใช้งาน** ใช้สำหรับการส่งสัญญาณวิทยุไปยังผู้ฟังทั่วไป โดยเฉพาะในยุโรปและเอเชีย

**คุณสมบัติ** ให้คุณภาพเสียงที่ดีขึ้นกว่า FM และมีการส่งข้อมูลเพิ่มเติม เช่น ข้อมูลเกี่ยวกับเพลงหรือข่าวสาร

**๓.๕.๑.๓ ระบบวิทยุแอนะล็อก (Analog Radio)** มีหลายรูปแบบที่ถูกพัฒนา และใช้งานมาเป็นเวลานาน โดยมีการใช้งานในหลากหลายสถานการณ์ ทั้งในภาคธุรกิจ การทหาร การสื่อสารส่วนบุคคล และอื่น ๆ ระบบวิทยุแอนะล็อกที่เป็นที่รู้จักและใช้งานกันทั่วไปมีดังนี้

### ๓.๕.๑.๓.๑ Amplitude Modulation (AM)

**การใช้งาน** ใช้ในการแพร่ภาพเสียงวิทยุ AM ซึ่งเป็นรูปแบบการส่งสัญญาณที่เก่าแก่ที่สุดและยังคงใช้งานในหลายประเทศทั่วโลก

**คุณสมบัติ** สัญญาณจะถูกส่งโดยการเปลี่ยนแปลง ความแรงของคลื่นพาหะ (Carrier Wave) ตามสัญญาณเสียง ข้อเสียของ AM คือ สัญญาณเสียงมักมีคุณภาพต่ำกว่า และไวต่อสัญญาณรบกวน

### ๓.๕.๑.๓.๒ Frequency Modulation (FM)

**การใช้งาน** ใช้ในการแพร่ภาพเสียงวิทยุ FM และการสื่อสารทางวิทยุในภาคส่วนต่าง ๆ

**คุณสมบัติ** สัญญาณถูกส่งโดยการเปลี่ยนแปลงความถี่ของคลื่นพาหะตามสัญญาณเสียงคุณภาพเสียงของ FM ดีกว่า AM และมีความต้านทานต่อสัญญาณรบกวนที่สูงกว่า

### ๓.๕.๑.๓.๓ Single Sideband (SSB)

**การใช้งาน** ใช้ในการสื่อสารทางวิทยุในภาคทหาร วิทยุสมัครเล่น และการสื่อสารทางทะเล

**คุณสมบัติ** เป็นรูปแบบหนึ่งของ AM ที่ส่งสัญญาณเพียงครึ่งหนึ่งของสัญญาณแบบสองด้านทำให้ประหยัดพลังงานและมีประสิทธิภาพในการใช้แบนด์วิดท์

### ๓.๕.๑.๓.๔ Continuous Wave (CW)

**การใช้งาน** ใช้ในการส่งข้อความด้วยรหัสสมอร์ส (Morse Code) โดยเฉพาะในวิทยุสมัครเล่นและการสื่อสารฉุกเฉิน

**คุณสมบัติ** ใช้การเปิด-ปิดคลื่นพาหะเพื่อส่งข้อมูล ข้อดีคือสามารถส่งสัญญาณได้ในระยะทางไกลด้วยพลังงานต่ำ

### ๓.๕.๑.๓.๕ Phase Modulation (PM)

**การใช้งาน** ใช้ในบางระบบการสื่อสารทางวิทยุ และเป็นพื้นฐานของการสื่อสารดิจิทัลบางประเภท

**คุณสมบัติ** ใช้การเปลี่ยนแปลงเฟสของคลื่นพาหะเพื่อส่งข้อมูล

### ๓.๕.๑.๓.๖ Very High Frequency (VHF) และ Ultra High Frequency (UHF) Radio

**การใช้งาน** ใช้ในการสื่อสารทางวิทยุทั่วไป เช่น วิทยุสองทาง (Two-Way Radio), การสื่อสารในอากาศยาน, การสื่อสารทางทะเล, วิทยุสมัครเล่น และวิทยุของหน่วยงานภาครัฐ

**คุณสมบัติ** VHF ใช้ในช่วงความถี่ที่ 30 MHz ถึง 300 MHz ส่วน UHF ใช้ในช่วงความถี่ที่ 300 MHz ถึง 3 GHz สัญญาณมีคุณภาพดีและครอบคลุมระยะทางสั้นถึงปานกลาง

**๓.๕.๑.๔ วิทยุแอนะล็อก (Analog Radio) และ วิทยุดิจิทัล (Digital Radio)**  
มีความแตกต่างกันทั้งในด้านเทคโนโลยีที่ใช้ การส่งสัญญาณ คุณภาพเสียง และการใช้งานโดยรวม สามารถสรุปความแตกต่างหลัก ๆ ได้ดังนี้

#### **๓.๕.๑.๔.๑ วิธีการส่งสัญญาณ**

**วิทยุแอนะล็อก** ใช้สัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการส่งข้อมูลเสียง โดยข้อมูลเสียงถูกแปลงเป็นคลื่นแอนะล็อกที่มีการแปรผันตามลักษณะของเสียงจริง เช่น การเปลี่ยนแปลงของความถี่ (Frequency Modulation - FM) หรือความแอมพลิจูด (Amplitude Modulation - AM)

**วิทยุดิจิทัล** ข้อมูลเสียงถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลในรูปของเลขฐานสอง (0 และ 1) ก่อนที่จะถูกส่งไปยังผู้รับ จากนั้นจะมีการถอดรหัสข้อมูลดิจิทัลเพื่อแปลงกลับเป็นเสียงในอุปกรณ์รับฟัง

#### **๓.๕.๑.๔.๒ คุณภาพเสียง**

**วิทยุแอนะล็อก** คุณภาพเสียงอาจได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวน เช่น เสียงซ่า (Static) หรือเสียงฮัม (Hum) ซึ่งเกิดจากการรบกวนของคลื่นวิทยุหรือการสะท้อนของคลื่นเสียงในระยะทางไกลและการรับสัญญาณอาจไม่คมชัดหากอยู่ในพื้นที่ที่มีสัญญาณอ่อนหรือหากมีอุปสรรคในการส่งสัญญาณ

**วิทยุดิจิทัล** ให้คุณภาพเสียงที่คมชัดและคงที่ เนื่องจากข้อมูลเสียงถูกเข้ารหัสและส่งในรูปแบบดิจิทัลที่มีการแก้ไขข้อผิดพลาด หากสัญญาณไม่ถูกต้อง ระบบสามารถตรวจจับและแก้ไขได้และมีความทนทานต่อสัญญาณรบกวนได้ดีกว่า ทำให้เสียงที่รับฟังมีความคมชัดแม้ในพื้นที่ที่มีสัญญาณอ่อน

#### **๓.๕.๑.๔.๓ การใช้งานคลื่นความถี่**

**วิทยุแอนะล็อก** การส่งสัญญาณใช้คลื่นความถี่อย่างไม่ประหยัด เนื่องจากแต่ละช่องสัญญาณจะถูกกำหนดให้กับสถานีวิทยุแต่ละแห่ง ซึ่งจำกัดจำนวนสถานีที่สามารถใช้งานได้ในพื้นที่หนึ่ง ๆ

**วิทยุดิจิทัล** ใช้คลื่นความถี่อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า โดยสามารถส่งสัญญาณเสียงหลายช่องในคลื่นความถี่เดียวกันผ่านการใช้เทคโนโลยีต่าง ๆ เช่น TDMA หรือ OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) และสามารถส่งข้อมูลเสริมเพิ่มเติม เช่น ข้อมูลเพลง, ข้อมูลข่าวสาร, และข้อมูลจราจร พร้อมกับสัญญาณเสียง

#### **๓.๕.๑.๔.๔ ความยืดหยุ่นและฟังก์ชันเพิ่มเติม**

**วิทยุแอนะล็อก** โดยทั่วไปมีฟังก์ชันที่จำกัด เน้นที่การกระจายเสียงเพลงและรายการพูดคุย

**วิทยุดิจิทัล** สามารถรองรับการส่งข้อมูลเพิ่มเติม เช่น ข้อความสั้น (SMS), ข้อมูล GPS, และข้อมูลเกี่ยวกับเพลง (เช่น ชื่อเพลงและศิลปิน) รวมถึงการส่งภาพหรือข้อมูลกราฟิกและสามารถรวมฟังก์ชันต่าง ๆ เช่น การสื่อสารสองทางในระบบความปลอดภัย (DMR หรือ TETRA) หรือการกระจายเสียงที่หลากหลาย (Multicast)

### ๓.๕.๑.๔.๕ ต้นทุนและความพร้อมใช้งาน

**วิทยุแอนะล็อก** ต้นทุนต่ำกว่าและมีการใช้งานแพร่หลาย

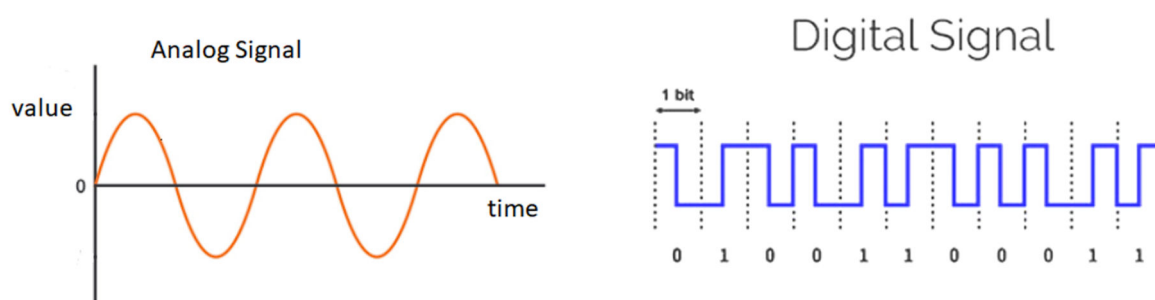
ในบางพื้นที่ โดยเฉพาะในประเทศที่กำลังพัฒนาและมีการใช้งานอย่างกว้างขวางมานานหลายสิบปี ทำให้มีความคุ้นเคยกับผู้ใช้งาน

**วิทยุดิจิทัล** ต้นทุนสูงกว่าในบางกรณี เนื่องจากต้องมีการ

ลงทุนในอุปกรณ์และโครงสร้างพื้นฐานใหม่และกำลังได้รับความนิยมมากขึ้นในประเทศที่พัฒนาแล้วเนื่องจากประสิทธิภาพที่ดีกว่า

#### ข้อสรุปความแตกต่าง

- **วิทยุแอนะล็อก** ใช้เทคโนโลยีเก่าในการส่งสัญญาณ โดยเน้นที่การส่งข้อมูลเสียงในรูปแบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คุณภาพเสียงอาจถูกลดทอนเนื่องจากการรบกวนและความอ่อนของสัญญาณ
- **วิทยุดิจิทัล** ใช้เทคโนโลยีใหม่ในการเข้ารหัสและส่งข้อมูลเสียงในรูปแบบดิจิทัล มีคุณภาพเสียงที่ดีกว่า การใช้งานคลื่นความถี่อย่างมีประสิทธิภาพ และมีความสามารถในการส่งข้อมูลเสริมเพิ่มเติม ซึ่งเหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการความยืดหยุ่นและประสิทธิภาพสูงกว่า



รูปภาพที่ ๓ - ๑๘ สัญญาณ Analog และ สัญญาณ Digital

### ๓.๕.๒ ระบบวิทยุข่ายควบคุมและสั่งการ

ข่ายการใช้งานหลักมีอยู่ ๓ ข่ายใหญ่ ๆ คือ

๑. ข่าย สท.ทอ.
๒. ข่าย อย.ทอ.
๓. ข่ายสนับสนุนทั่วไป

ระบบวิทยุข่ายควบคุมและสั่งการ ถูกนำไปใช้งานโดยแบ่งตามลักษณะการใช้งาน

๔ ชนิด คือ

๓.๕.๒.๑. วิทยุชนิดมือถือ (Hand-Held)

๓.๕.๒.๒. วิทยุชนิดติดรถยนต์ (Mobile Radio หรือ Vehicle Radio)

๓.๕.๒.๓. วิทยุชนิดประจำที่ (Base Station)

๓.๕.๒.๔. วิทยุชนิดทวนสัญญาณ (Repeater)

### ๓.๕.๒.๑ วิทยุชนิดมือถือ (Hand-Held)

วิทยุชนิดมือถือ (Hand-Held Radio หรือ Portable Radio) เป็นอุปกรณ์สื่อสารวิทยุที่สามารถพกพาได้สะดวก เนื่องจากมีขนาดเล็กและเบา ใช้ในการสื่อสารแบบสองทางระหว่างบุคคลในระยะใกล้ถึงปานกลาง โดยไม่ต้องพึ่งพาเครือข่ายโทรคมนาคม ทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานในหลาย ๆ สถานการณ์ที่ต้องการการสื่อสารอย่างรวดเร็วและยืดหยุ่น



รูปภาพที่ ๓ - ๑๙ วิทยุชนิดมือถือ (Hand-Held)

#### ๓.๕.๒.๑.๑ คุณสมบัติและการทำงานของวิทยุชนิดมือถือ

๑) ขนาดเล็กและพกพาสะดวก วิทยุมือถือมักมีขนาดเล็ก สามารถใส่ในกระเป๋าหรือเหน็บกับเข็มขัดได้ ทำให้สะดวกต่อการพกพา

๒) กำลังส่งต่ำ เนื่องจากเป็นอุปกรณ์พกพา กำลังส่งของวิทยุชนิดมือถือมักต่ำกว่าวิทยุชนิดประจำที่หรือวิทยุชนิดติดรถยนต์ แต่ยังคงมีความสามารถในการสื่อสารในระยะทางที่เหมาะสม (มักอยู่ในระยะไม่เกิน ๑ - ๕ กิโลเมตร ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม)

๓) แบตเตอรี่ภายใน ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ที่สามารถชาร์จใหม่ได้ ซึ่งมักจะมีอายุการใช้งานที่ยาวนานพอสำหรับการใช้งานทั้งวัน

๔) ฟังก์ชันการใช้งานหลากหลาย เช่น การสแกนช่องสัญญาณ การตั้งค่าความถี่หลายช่อง และฟังก์ชัน PTT (Push-To-Talk) สำหรับการสื่อสารแบบกดพูด

#### ๓.๕.๒.๑.๒ การใช้งานของวิทยุชนิดมือถือ

๑) หน่วยงานรักษาความปลอดภัย เช่น ตำรวจ หรือ รปภ. สำหรับการสื่อสารภายในทีมระหว่างปฏิบัติงาน

๒) การจัดการกิจกรรมหรืออีเวนต์ ใช้ในการประสานงานระหว่างทีมงานในสถานที่จัดงาน

๓) การเดินทางและกิจกรรมกลางแจ้ง เช่น การเดินป่า หรือกิจกรรมแคมป์ปิ้ง เพื่อสื่อสารระหว่างกลุ่มคนที่อยู่ในพื้นที่ห่างไกลจากสัญญาณโทรศัพท์

### ๓.๕.๒.๒ วิทยุชนิดติดรถยนต์ (Mobile Radio หรือ Vehicle Radio)



รูปภาพที่ ๓ - ๒๐ วิทยุชนิดติดรถยนต์ (Mobile Radio หรือ Vehicle Radio)

#### วิทยุชนิดติดรถยนต์ (Mobile Radio หรือ Vehicle Radio)

เป็นอุปกรณ์สื่อสารที่ติดตั้งในยานพาหนะ เช่น รถยนต์ รถบรรทุก หรือรถพยาบาล ซึ่งใช้ในการสื่อสารแบบวิทยุ สำหรับผู้ที่ต้องการการเชื่อมต่ออย่างต่อเนื่องในขณะที่เคลื่อนที่

#### ๓.๕.๒.๒.๑ คุณสมบัติและการทำงานของวิทยุชนิดติดรถยนต์

๑) การติดตั้งในยานพาหนะ วิทยุติดรถยนต์จะถูกติดตั้งในตัวรถ โดยมีเสาอากาศติดตั้งบนหลังคาหรือในตำแหน่งที่สามารถรับสัญญาณได้ดี

๒) กำลังส่งที่เหมาะสม มักมีกำลังส่งสูงกว่าเครื่องวิทยุพกพา แต่ต่ำกว่าวิทยุประจำที่ เพื่อให้ครอบคลุมระยะทางที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานบนท้องถนน

๓) การใช้งานง่าย ควบคุมผ่านหน้าจอและปุ่มกดที่ออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่าย แม้ในขณะที่ขับรถ

๔) ความยืดหยุ่นในการสื่อสาร สามารถเชื่อมต่อกับสถานีวิทยุชนิดประจำที่หรือชนิดทวนสัญญาณ เพื่อขยายขอบเขตการสื่อสาร

#### ๓.๕.๒.๒.๒ การใช้งานของวิทยุชนิดติดรถยนต์

๑) รถควบคุมและสั่งการ สำหรับการสื่อสารระหว่างหน่วยงานและสถานีควบคุม

๒) รถพยาบาล เพื่อประสานงานกับโรงพยาบาลหรือหน่วยงานทางการแพทย์

๓) รถขนส่งและรถบรรทุก เพื่อสื่อสารระหว่างพนักงานขับรถและศูนย์ควบคุมหรือผู้ประสานงาน

### ๓.๕.๒.๓ วิทยุชนิดประจำที่ (Base Station)



รูปภาพที่ ๓ - ๒๑ วิทยุชนิดประจำที่ VHF/FM (Base Station)

วิทยุชนิดประจำที่ (Base Station) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการสื่อสารวิทยุที่ติดตั้งอยู่ที่สถานีหลักหรือจุดคงที่ อุปกรณ์นี้ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการสื่อสารระหว่างหน่วยงานต่าง ๆ หรือผู้ใช้งานวิทยุที่อยู่ในพื้นที่ครอบคลุมของสถานี โดยมีลักษณะการทำงานที่เน้นความเสถียร ความแรงของสัญญาณ และความต่อเนื่องในการสื่อสาร

#### ๓.๕.๒.๓.๑ คุณสมบัติและการทำงานของวิทยุชนิดประจำที่

๑) กำลังส่งสูง วิทยุประจำที่มักมีกำลังส่งที่สูงกว่าเครื่องวิทยุพกพาหรือวิทยุเคลื่อนที่ เพื่อให้สัญญาณสามารถครอบคลุมพื้นที่กว้างไกล

๒) เสอาอากาศที่มีประสิทธิภาพ เสอาอากาศที่ใช้ร่วมกับวิทยุประจำที่มักจะมีขนาดใหญ่และติดตั้งในตำแหน่งสูง เช่น บนยอดตึก หรือบนหอคอย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งและรับสัญญาณ

๓) การใช้งานต่อเนื่อง วิทยุประจำที่มักถูกออกแบบมาให้ทำงานได้ตลอดเวลา โดยมีระบบระบายความร้อนและระบบพลังงานสำรอง เพื่อรองรับการใช้งานในสถานการณ์ฉุกเฉิน

๔) ความยืดหยุ่นในการเชื่อมต่อ วิทยุชนิดประจำที่สามารถเชื่อมต่อกับระบบสื่อสารอื่น ๆ เช่น วิทยุชนิดทวนสัญญาณ หรือเครือข่ายโทรคมนาคม เพื่อขยายขอบเขตการสื่อสาร

#### ๓.๕.๒.๓.๒ การใช้งานของวิทยุชนิดประจำที่

๑) ศูนย์ควบคุมการจราจร เพื่อสื่อสารกับยานพาหนะหรือเจ้าหน้าที่ภาคสนาม

๒) ศูนย์ควบคุมและสั่งการ เพื่อประสานงานระหว่างหน่วยงานและการจัดการเหตุการณ์ฉุกเฉิน

๓) หน่วยงานภาครัฐและองค์กรต่าง ๆ สำหรับการสื่อสารในพื้นที่กว้าง เช่น ในสนามบินหรือท่าเรือ



### ๓.๕.๒.๔ วิทยุชนิดทวนสัญญาณ (Repeater)

วิทยุชนิดทวนสัญญาณ (Repeater) คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการสื่อสารแบบวิทยุที่ช่วยขยายขอบเขตของสัญญาณวิทยุให้ไกลขึ้น โดยทำงานโดยการรับสัญญาณวิทยุจากสถานีต้นทางหรือผู้ใช้ และทำการขยายสัญญาณนั้นแล้วส่งออกไปในระยะทางที่ไกลกว่าเดิม



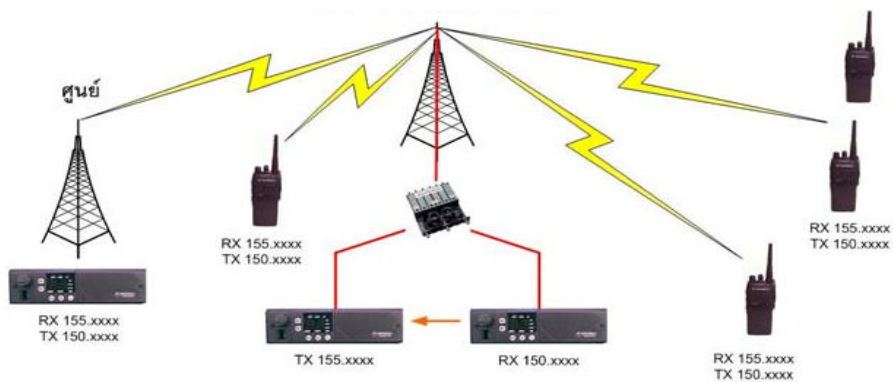
รูปภาพที่ ๓ - ๒๒ วิทยุชนิดทวนสัญญาณ (Repeater)

#### ๓.๕.๒.๔.๑ การทำงานของวิทยุชนิดทวนสัญญาณมีขั้นตอนดังนี้

- ๑) **รับสัญญาณ** วิทยุชนิดทวนสัญญาณจะรับสัญญาณวิทยุจากสถานีต้นทางหรือผู้ใช้ที่อยู่ในขอบเขตการรับสัญญาณของชนิดทวนสัญญาณ
- ๒) **ขยายสัญญาณ** วิทยุชนิดทวนสัญญาณที่รับมาจะถูกขยายหรือเพิ่มกำลังสัญญาณ
- ๓) **ส่งสัญญาณออก** วิทยุชนิดทวนสัญญาณจะส่งสัญญาณที่ขยายแล้วออกไปทางสายอากาศ เพื่อให้สัญญาณนั้นสามารถถูกรับได้ในระยะทางที่ไกลขึ้น

#### ๓.๕.๒.๔.๒ การใช้งานของวิทยุชนิดทวนสัญญาณ

- ๑) การสื่อสารของหน่วยงานรัฐและหน่วยงานความปลอดภัย เพื่อให้การสื่อสารครอบคลุมพื้นที่กว้างขวางและไม่ขาดช่วง
- ๒) เครือข่ายวิทยุสื่อสารในองค์กร เช่นในสนามบิน โรงงาน หรือโรงพยาบาล เพื่อให้การติดต่อภายในองค์กรมีความต่อเนื่อง
- ๓) เครือข่ายวิทยุสมัครเล่น เพื่อให้ผู้ใช้งานวิทยุสามารถติดต่อกันได้ในระยะทางที่ไกลขึ้น



รูปภาพที่ ๓ - ๒๓ รูปแบบการใช้งานของวิทยุชนิดทวนสัญญาณ  
ใช้ได้ทั้งสัญญาณ Analog และ สัญญาณ Digital

## บทที่ ๔

### แนวโน้มการพัฒนาของเทคโนโลยีในอนาคต

#### ๔.๑ กล่าวนำ

การพัฒนาเทคโนโลยีมีแนวโน้มว่าการสื่อสารในอนาคต จะมีอิทธิพลต่อบทบาทของกองทัพ มีผลกระทบโดยตรงต่อการสนับสนุนภารกิจทางทหาร ทั้งยังเป็นตัวขับเคลื่อนสำคัญในการกำหนดแนวทางในการพัฒนา Hardware Software และ Peopleware โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบการสื่อสารแบบไร้สายและระบบเชื่อมโยงข้อมูล (Data Link) เมื่อเทคโนโลยีมีความก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว และมีการพัฒนาการอย่างต่อเนื่อง เริ่มจากระบบแอนะล็อกในยุคที่ 1 มาเป็นระบบดิจิทัลในยุคที่ 2 และกำลังจะก้าวเข้าสู่ยุคที่ 3 (Third Generation) ซึ่งเป็นการหลอมรวมเทคโนโลยีเข้าด้วยกัน (Technology Convergence) ระหว่างระบบสื่อสารไร้สายและสื่อผสมอื่น ๆ หน่วยงานของ ทอ.จึงจำเป็นต้องศึกษาวิเคราะห์ข้อมูลในการกำหนดภัยคุกคาม เพื่อใช้ในการวางแผนอย่างมีทิศทาง ถูกต้อง และสอดคล้องกับแผนการพัฒนาเทคโนโลยีสื่อสารในอนาคต

ความถี่ที่ถูกนำมาใช้งานปัจจุบันมีย่านความถี่ระหว่าง 3 kHz – 60 GHz สำหรับย่านความถี่ตั้งแต่ 60 - 300 GHz สามารถนำมาใช้งานได้ในทางเทคนิค ในขณะที่ความถี่ 300 GHz ขึ้นไปยังไม่ได้มีการพิจารณาใช้งาน โดยมีองค์กรที่ทำหน้าที่กำกับดูแลความถี่ในระดับโลก ๓ องค์กร คือ ITU (International Telecommunication Union), FCC (Federal Communication Commission) และ WRC (World Radio Conference)

ปัจจุบันกองทัพอากาศ อยู่ในระหว่างการเตรียมการเข้าสู่เทคโนโลยีสื่อสารไร้สายในยุคที่ 3 ซึ่ง ทอ.ก็ได้นำเทคโนโลยีที่ทันสมัย รวดเร็ว และปลอดภัยมาใช้ในระบบป้องกันทางอากาศ (RTADS Phase I, II, III) และเตรียมแผนพัฒนาโครงสร้างของระบบเพื่อก้าวสู่ยุค Digital Air Force

#### ๔.๒ ระบบวิทยุ HAVE QUICK

ระบบวิทยุสื่อสารที่ใช้งานทั่วไป เป็นการสื่อสารแบบ Two Way Single Channel ปัญหาที่เกิดกับวิทยุประเภทนี้ คือ การรักษาความปลอดภัย (Security) และการรบกวน (Jamming) โดยเฉพาะในกิจการทางทหารแล้ว ถือว่ามีความสำคัญมาก สามารถบอกถึงผลแพ้ชนะของการสู้รบได้

วิธีการแก้ปัญหาดังกล่าว สามารถทำได้ ๔ วิธี คือ

๑. เพิ่มกำลังของเครื่องส่ง และลดความไวในการรับของเครื่องรับ
๒. ใช้อุปกรณ์เข้ารหัส Encrypt หรือ Scramble (ECCM)
๓. เปลี่ยนความถี่ (ECCM)
๔. ขยายแถบความถี่ให้กว้างขึ้น (ECCM)

ระบบวิทยุ Have Quick เป็นระบบวิทยุที่นำเอาเทคนิควิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวมาใช้งาน เพื่อให้ระบบมีความน่าเชื่อถือสูง และปลอดภัย สามารถสนับสนุนภารกิจทางทหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## • ความเป็นมา

Have Quick เป็นระบบวิทยุที่พัฒนาขึ้นโดยกระทรวงกลาโหม สหรัฐอเมริกา (US DoD) หลังจากสิ้นสุดสงครามความขัดแย้งระหว่างประเทศอาหรับกับอิสราเอล ในสงคราม Yom Kippur ค.ศ.1973 อาหรับประสบความสำเร็จในการรบกวนการติดต่อสื่อสารแบบ Voice ในระหว่างที่ทั้งสองฝ่ายเผชิญหน้ากัน ขณะนั้น กองทัพสหรัฐอเมริกายังล่าช้าหลังกับการป้องกันการรบกวนของฝ่ายข้าศึก โดยเฉพาะเทคโนโลยีการต่อต้านการสื่อสารของสหภาพโซเวียตรัสเซีย ทำให้การปฏิบัติการทางทหารของฝ่ายสหรัฐอเมริกาเป็นไปอย่างยากลำบาก

สหรัฐอเมริกาจึงได้เริ่มแนวคิดการพัฒนา ระบบสื่อสาร เพื่อป้องกันการตอบโต้และต่อต้านทางอิเล็กทรอนิกส์ขึ้นในปี ค.ศ.1975 โดยทดลองใช้เทคนิคของ Slow Hopping ใส่เข้าไปในวิทยุติดตั้งบนเครื่องบินแบบ ARC-164 และในปลายปี ค.ศ.1978 นี้เอง บริษัท Magnavox ก็ประสบความสำเร็จในการคิดค้นเทคโนโลยี Have Quick และเริ่มนำมาใช้งานเป็นครั้งแรกปลายปี ค.ศ.1980 เรียกว่า Have Quick I (HQ I) จนกระทั่งต้นปี ค.ศ.1981 จึงได้พัฒนาสู่ Have Quick II (HQ II) Have Quick จึงเป็นระบบวิทยุ ECCM ย่านความถี่ UHF/AM ที่ถูกนำมาใช้ในการติดต่อสื่อสารประเภทอากาศสู่อากาศ พื้นสู่อากาศ เพื่อต่อต้านการรบกวนการปฏิบัติทางทหารที่เน้นการใช้กำลังทางอากาศผ่านเครื่องบินขับไล่สมรรถนะสูง โหมดที่ใช้ในการติดต่อสื่อสาร มี ๒ โหมด คือ Plain Mode (Voice mode) และ Secure Mode ทำงานในย่านความถี่ 225 - 399.975 MHz, AM Bandwidth 25 kHz and Non-Encrypted Signal Bandwidth (300 - 3000 Hz)

### ๔.๒.๑ เทคนิคที่ถูกนำมาใช้ในระบบวิทยุ Have Quick

เทคนิคของวิทยุ Have Quick ที่ถูกนำมาใช้ เป็นการประสมประสานการทำงาน ของการทำงานภาครับ-ส่งของวิทยุในแบบ Synchronization ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าระบบวิทยุ Have Quick จะสามารถใช้งานได้โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดในสถานการณ์การรบอย่างแท้จริง เทคนิคทั้ง ๓ แบบที่ถูกนำมาใช้ คือ

#### ๔.๒.๑.๑ ความถี่ก้าวกระโดด (Frequency Hopping)

หมายถึงเทคนิคการเปลี่ยนความถี่ที่ส่งออกไป ณ เวลาหนึ่ง จากนั้น เครื่องส่งจะเปลี่ยนความถี่ที่ส่งเป็นความถี่ใหม่ ในขณะที่เดียวกันภาคเครื่องรับก็จะเปลี่ยนความถี่ไปพร้อม ๆ กับ เครื่องส่งอย่างสัมพันธ์กัน และทำการเปลี่ยนความถี่อย่างนี้ไปเรื่อย ๆ เพื่อให้การรบกวนทำได้ยากขึ้นยังมี จำนวนความถี่เปลี่ยนแปลงมากขึ้น การดักฟังและรบกวนก็จะยิ่งทำได้ยากยิ่งขึ้น

#### ๔.๒.๑.๒ อัตราการกระโดด (Hop Rate)

หมายถึง จำนวนครั้งของความถี่ที่เปลี่ยนแปลงในห้วงเวลาหนึ่ง ปกติ ใช้หน่วยวินาที (Second) เช่น อัตราการกระโดด เท่ากับ 50 Hop หมายถึงวิทยุเครื่องนี้มีอัตราการกระโดด อยู่ที่ ๕๐ ครั้งต่อวินาที อัตราการกระโดดยิ่งเร็วการดักฟังหรือรบกวนก็จะทำได้ยากขึ้น แต่มีข้อเสียในเรื่องของการ Synchronization

### ๔.๒.๑.๓ Dwell Time

หมายถึง ระยะเวลาที่ความถี่หยุดหรือค้างอยู่ ณ เวลาหนึ่ง ก่อนที่จะกระโดดไปยังอีกความถี่หนึ่ง ระยะเวลาที่ค้างอยู่นี้มีอัตราที่ไม่แน่นอน ไม่อาจคาดคำนวณได้ จึงยากต่อการดักฟังและรบกวนจากฝ่ายตรงข้าม ระยะเวลาที่ค้างอยู่มีหน่วยเป็น milli Second (mS) เช่น เครื่องส่งวิทยุ ออกอากาศที่ความถี่ XXX.XXX MHz และค้างอยู่ประมาณ 2 mS ก่อนที่จะกระโดดไปยังความถี่ใหม่ YYY.YYY MHz และค้างอยู่เป็นเวลา 3 mS ก่อนจะกระโดดไปยังความถี่ถัดไป เป็นต้น

## ๔.๒.๒ พารามิเตอร์ที่ใช้ในการโปรแกรมระบบวิทยุ Have Quick

### ๔.๒.๒.๑ Word of Day (WOD)

เป็นชุดโปรแกรมความถี่ที่อยู่ในย่าน UHF: 225-399.975 MHz ชุดแรกที่ต้องป้อนให้กับเครื่องวิทยุ ชุดโปรแกรมดังกล่าวนี้จะถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำของเครื่องก่อนนำไปประมวลผล กำหนดใช้เป็นความถี่ก้าวกระโดด โดยแบ่งออกเป็น ๒ แบบ คือ Training Mode และ Full Up (War Mode) กระทรวงกลาโหมสหรัฐอเมริกา ได้กำหนดให้ชาติสมาชิกทั้งที่เป็นพันธมิตร และ NATO ต้องใช้ Full Up หรือ War Mode (บางครั้งเรียกว่า Combat Mode) ในช่วงเวลาที่เกิดสงครามเท่านั้น โดยผ่านอุปกรณ์เข้ารหัส เรียกว่า “Crypto” และในกรณีประเทศไม่ได้อยู่ในภาวะสงครามต้องใช้ WOD ที่เป็น Training Mode เท่านั้น ทั้งนี้เพื่อไม่ให้เกิดการใช้งานเกินความจำเป็นและอาจเป็นสาเหตุให้ข้าศึกคิดค้นอุปกรณ์ดักจับหรือรบกวนได้

นอกจากนั้นแล้ว WOD Training Mode ยังแบ่งออกเป็น ๒ ชนิด คือ

- Training Net (T-Net) เป็นชุดโปรแกรมที่กำหนดให้ใช้งานในช่วงเวลาปกติ เพื่อใช้ในการฝึกปฏิบัติ ประกอบด้วยกลุ่มความถี่จำนวน 6 WOD ที่ใช้งานมี ๒ แบบ คือ Single WOD เป็นการป้อนชุดโปรแกรม WOD จำนวน ๑ ชุด ชุดโปรแกรม WOD นี้ จะถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำของเครื่องวิทยุ เพื่อพร้อมในกรณีเรียกออกมาใช้งาน

- Multiple WOD (MWOD) เป็นการป้อนชุดโปรแกรม WOD มากกว่า ๑ ชุดขึ้นไป เพื่อเก็บไว้ในหน่วยความจำเครื่องวิทยุ การป้อนชุดโปรแกรม WOD แบบ MWOD แต่ละชุดจะต้องตามด้วยวันที่ปฏิบัติงาน (Date Tag) เสมอ แล้วจึงจะทำการป้อนชุดโปรแกรม WOD ลำดับถัดไป ให้ทำสลับกันจนครบจำนวนวันที่ต้องการ MWOD สามารถป้อนได้สูงสุดจำนวน ๖ ชุด

- Frequency Management Training Mode (FMT Net) เป็นการป้อนชุดโปรแกรมเพื่อใช้งานในช่วงเวลาปกติ ประกอบด้วยกลุ่มความถี่จำนวน 16 WOD เพื่อให้การดักฟังหรือรบกวนจากฝ่ายตรงข้ามทำได้ยากยิ่งขึ้น

### ๔.๒.๒.๒ Time of Day (TOD)

หมายถึง เวลาสัมพันธ์การก้าวกระโดด ซึ่งจำเป็นต้องใช้ Clock ในการกำหนดจังหวะการก้าวกระโดด อาจเป็นสัญญาณนาฬิกาในตัวเครื่องวิทยุ (Internal Clock) หรือสัญญาณนาฬิกาจากภายนอกที่เป็นเวลามาตรฐาน (Universal Time Clock : UTC) ปัจจุบัน NATO ใช้เป็นสัญญาณนาฬิกามาตรฐานในระบบ Have Quick เช่น GPS Receiver เป็นต้น การส่งผ่านระหว่างเครื่องวิทยุสามารถทำได้โดยตรงเข้ากับตัวเครื่องวิทยุหรือส่งผ่านสัญญาณ RF ของเครื่องส่งก็ได้

### ๔.๒.๒.๓ Net Number

หมายถึง หมายเลขของกลุ่มวิทยุที่ต้องการติดต่อใช้งานภายในกลุ่มเดียวกันเท่านั้น วิทยุใน Network เดียวกัน จำเป็นต้องมี WOD และ TOD เหมือนกัน หมายเลขกลุ่ม หรือ Net Number ของแต่ละระบบ Have Quick จะมีหมายเลขต่างกัน เช่น HQ I จะมีหมายเลขกลุ่มต่างไปจาก HQ II ผู้ที่ทำหน้าที่เป็นเจ้าหน้าที่โปรแกรมในระบบวิทยุ HQ จำเป็นต้องรู้ขอบเขตของหมายเลขกลุ่มวิทยุ HQ ที่ใช้งานของตนเป็นอย่างดี Net Number จะอยู่ในรูปแบบของตัวเลขและตัวอักษร เช่น AXX.XYY โดยมี ๒ แบบ ด้วยกันคือ

#### - Combat Mode

AXX.X00HQI

AXX.X25HQII NATO

AXX.X50HQII Non-NATO (รวมถึงประเทศไทย)

AXX.X75HQIIA (Saturn)

#### - Training Mode (T-Net)

AXX.X00HQI, XX.X = 000 – 004 (5 Nets)

AXX.X25HQII, XX.X = 000 – 015 (16 Nets)

AXX.X50Invalid, not used

AXX.X75Invalid, not used

สำหรับกองทัพอากาศไทย เป็นพันธมิตรของประเทศสหรัฐ ฯ ดังนั้นระบบวิทยุ HQ ที่ถูกนำมาใช้คือระบบวิทยุ HQ II หมายเลขกลุ่ม หรือ Net Number ที่ถูกกำหนดให้ใช้งานแบบ Combat Mode และ Training Mode มีดังนี้

- T-Net หมายเลขกลุ่ม หรือ Net Number แบ่งออกเป็น ๕ กลุ่ม คือ 300.000 ถึง 300.400

- FMT-Net หมายเลขกลุ่ม หรือ Net Number แบ่งออกเป็น ๑๖ กลุ่ม คือ 300.025 ถึง 301.525

วิทยุ Have Quick ที่ต้องการติดต่อใช้งานด้วยกันต้องมี WOD-TOD-Net Number เดียวกัน

### ๔.๒.๓ Warning Tone

เสียงสัญญาณเตือน หรือ Warning Tone เป็นเสียงที่เกิดขึ้นเมื่อผู้ใช้งานเข้าสู่โหมด ECCM หรือ AJ (Anti Jamming) ในระบบวิทยุ HQ ว่ามีข้อบกพร่องหรือไม่สมบูรณ์จากการป้อนค่าพารามิเตอร์หลัก โดยสรุปสาเหตุของสัญญาณเตือนได้ ๓ กรณี คือ

๔.๒.๓.๑ Continuous Tone เกิดจากค่า TOD ไม่ถูกต้องหรือขาดความ สมบูรณ์ลักษณะของเสียงสัญญาณเตือนเป็นเสียง Beep ยาวต่อเนื่อง

๔.๒.๓.๒ Continuous Tone เกิดจากค่า WOD ไม่ถูกต้องหรือไม่สมบูรณ์ ลักษณะของเสียงสัญญาณเตือนเป็นเสียง Beep ยาวต่อเนื่อง

๔.๒.๓.๓ Interrupted Tone เกิดจากการใช้ค่า Net Number ไม่ถูกต้อง หรือตรงกับข้อกำหนดในระบบ HQ ลักษณะเสียงสัญญาณเตือนเป็นเสียง Beep สั้น ๆ ดังสลับต่อเนื่อง เช่น Beep Beep .... ....

#### ๔.๒.๔ การส่งและรับสัญญาณ TOD

การส่งและรับสัญญาณ TOD ในระบบวิทยุ Have Quick จะต้องกำหนดหน้าที่ของผู้ปฏิบัติให้ชัดเจน ผู้ที่ทำหน้าที่ Send TOD หรือเรียกว่า “Master” จะทำหน้าที่ส่งสัญญาณนาฬิกา (Clock) เพื่อกำหนดจังหวะในการก้าวกระโดด (Synchronization) ให้กับผู้รับสัญญาณ TOD ที่มี WOD และ Net Number เหมือนกัน หรือเรียกว่า “Slave” ในกรณีที่สัญญาณ TOD ไม่สมบูรณ์หรือไม่ถูกต้อง เมื่อเข้าสู่โหมด ECCM หรือ AJ (Anti Jamming) จะมีเสียง Continuous Tone เตือนให้ทราบ ในทางปฏิบัติผู้ทำหน้าที่ Send TOD จะกำหนดช่วงเวลาในการส่งสัญญาณ หากผู้รับสัญญาณ TOD ไม่ได้รับสัญญาณต้องแจ้งให้กับ Master ทราบ เพื่อทำการส่งสัญญาณ TOD หรือบางทีเรียกว่า “Hack Time” ใหม่อีกครั้ง เพื่อให้ระบบ HQ สามารถทำงานได้ถูกต้อง

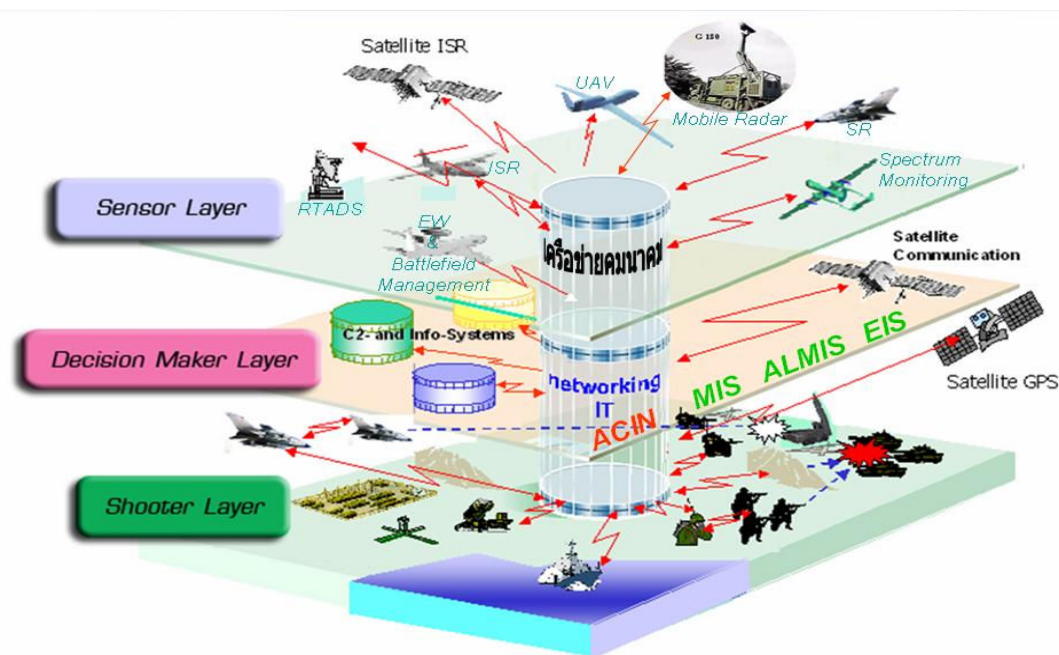
การส่งและรับสัญญาณ TOD ของเครื่องรับ-ส่งวิทยุที่ต่างบริษัทผู้ผลิตอาจมีความแตกต่างกันบ้าง แล้วแต่การออกแบบการทำงานของวิทยุ อย่างไรก็ตามหากพิจารณาให้ดีแล้วจะพบว่าค่าพารามิเตอร์หลักที่ต้องใช้ในระบบ HQ ต่างก็มีค่าพารามิเตอร์เหมือนกันทุกประการ

### ๔.๓ Network Centric Operation (NCO)

#### ๔.๓.๑ กล่าวทั่วไป

สภาพสิ่งแวดล้อมของโลกที่เปลี่ยนแปลงไปจากยุคอุตสาหกรรม (Industrial Age) มาสู่ยุคข้อมูลข่าวสาร (Information Age) ที่เป็นผลสืบเนื่องมาจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีสารสนเทศ และการสื่อสารผลักดันทำให้เกิดสงครามยุคใหม่เป็นสงครามในยุคข้อมูลข่าวสาร (Information Age Warfare) โดยใช้เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร ในการเชื่อมเครือข่ายและระบบข้อมูลข่าวสารระหว่างหน่วยงานกำลังต่าง ๆ ของฝ่ายเรา โดยมีองค์ประกอบหลักของความเสถียรภาพของระบบที่มีศูนย์กลางการปฏิบัติ (Centric Warfare) ทั้งโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure System) ของระบบสารสนเทศที่เป็นระบบงานด้านต่าง ๆ สนับสนุน และระบบสื่อสารโทรคมนาคม อิเล็กทรอนิกส์ ให้เป็นมาตรฐานเดียวกันตลอดทั่วทั้งกองทัพอากาศและเป็นการบูรณาการระบบต่าง ๆ ให้สามารถใช้ประโยชน์ร่วมกันได้

นโยบายของผู้บัญชาการทหารอากาศ ปี พ.ศ.๒๕๕๐ ในด้านการพัฒนาเทคโนโลยีและการสื่อสาร ให้พัฒนาโครงสร้างพื้นฐานทั้งระบบสารสนเทศและการสื่อสารให้เป็นศูนย์กลางการปฏิบัติ (Centric Operation) มุ่งสู่การปฏิบัติการใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง (NCO : Network Centric Operation) ในการดำรงและรองรับข่ายการติดต่อสื่อสารทุกชนิดได้ อีกทั้งใช้ระบบสารสนเทศแบบบูรณาการ (Data Centric Operation) เข้าด้วยกัน โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อดำรงและรองรับข่ายการติดต่อสื่อสารทุกชนิด ประสานการทำงานเข้าด้วยกันอย่างมีประสิทธิภาพและประสิทธิผลสูงสุด



รูปที่ ๔ - ๑ การปฏิบัติการใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง (NCO : Network Centric Operation)

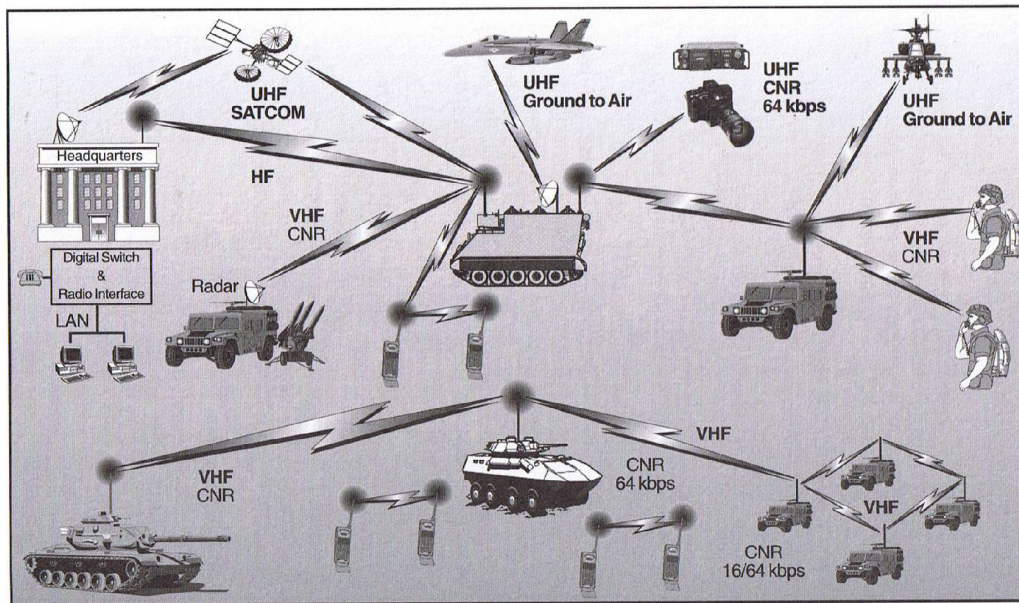
#### ๔.๓.๒ การปฏิบัติการที่ใช้วิทยุเป็นศูนย์กลางเครือข่าย (Radio Centric Network)

หมายถึงการปฏิบัติการที่นำเอาระบบวิทยุมาใช้เป็นตัวเชื่อมเครือข่ายทางวิทยุเข้าด้วยกัน แล้วทำการประมวลผลที่ศูนย์ควบคุม เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการควบคุม สั่งการ และตัดสินใจการใช้การปฏิบัติการทางทหาร โดยมีเวลาใกล้เคียงกับเวลาจริงมากที่สุด (Near Real Time) ซึ่งถือเป็นส่วนหนึ่งของ C<sup>4</sup>I (Command, Control, Communication, Computer and Intelligence) ปัจจุบันกระทรวงกลาโหมไทยได้พัฒนาเป็นระบบ C<sup>4</sup>ISR (Command, Control, Communication, Computer and Intelligence, Surveillance, Reconnaissance)

จากรูป ๔.๒ เป็นการนำเอาข้อมูลข่าวสารจากเครือข่ายต่าง ๆ เช่น สัญญาณจากรเรดาร์, ดาวเทียม, เรือ, อากาศยาน และ PC Data มาเชื่อมต่อเข้าด้วยกันระบบวิทยุ HF, VHF, UHF ซึ่งจะทำให้ศูนย์ควบคุมและหน่วยทางยุทธวิธีที่อยู่ในเครือข่ายเดียวกัน สามารถรับรู้ข้อมูลและประสานการปฏิบัติการทางทหารได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีประสิทธิผล

การที่จะใช้วิทยุเป็นศูนย์กลางในการเชื่อมต่อเครือข่าย จำเป็นจะต้องวางแผนจัดการระบบวิทยุที่มีขีดความสามารถในการรับ-ส่งข้อมูล ทั้ง ๒ ระบบ คือ วิทยุที่ติดตั้งใช้งานภาคพื้นและวิทยุติดตั้งบนอากาศยาน การวางระบบโครงข่าย รวมทั้งระบบรักษาความปลอดภัย (Security system) ที่สร้างความมั่นใจในการปฏิบัติการทางทหาร มีความถูกต้อง รวดเร็ว แม่นยำ เป็นต้น





รูปที่ ๔ - ๒ การปฏิบัติการที่ใช้วิทยุเป็นศูนย์กลางเครือข่าย (Radio Centric Network)

สิ่งสำคัญที่กองทัพอากาศกำลังดำเนินการคือการจัดเตรียมบุคลากรเพื่อรองรับระบบ การพัฒนาและเพิ่มขีดความสามารถให้กับบุคลากรของกองทัพ เหล่านี้จะช่วยให้กองทัพเข้าสู่เทคโนโลยีแห่งยุคที่ ๓ ตามวิวัฒนาการของโลกได้อย่างมั่นคง

-----

# บรรณานุกรม

## ภาษาไทย

สมคิด วิริยประสิทธิ์ชัย. “ความรู้เบื้องต้นทางอิเล็กทรอนิกส์.” ๒๕๓๖  
แผนกซ่อมวิทยุภาคพื้น. “ระบบวิทยุควบคุมการบิน (VHF/UHF/AM).” ๒๕๔๗  
ชูชัย ธารสารตั้งเจริญ และ พิชัย ภักดีพานิชเจริญ. “ระบบสื่อสารวิทยุ.” ๒๕๔๓  
พ.ต.ท.สุชาติ กังวารจิตต์. “หลักการทางงานเครื่องรับส่งวิทยุและระบบวิทยุสื่อสาร.” ๒๕๔๓  
อทร.๕๘๐๖. “หลักการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ.” ๒๕๔๓  
“เครื่องส่งรับวิทยุแบบดิจิทัลและเครื่องส่งรับวิทยุแบบอนาล็อกแตกต่างกันอย่างไร.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <https://m.th.ecomeradio.com> ๒๕๖๓. สืบค้น ๙ กรกฎาคม ๒๕๖๗  
ชัยชัย ตระกูลเลิศยศ. “ความแตกต่าง Analog และ Digital.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <https://scimath.org> ๒๕๕๙. สืบค้น ๙ กรกฎาคม ๒๕๖๗

## ภาษาอังกฤษ

Australian Defense. **Radio Frequency Management (Phase 1-8):** August 2001  
Rockwell Collins. **Have Quick Briefing:** February 2004  
Park Air Electronics. **Have Quick System:** 2000  
Gary M. Miller. **Modern Electronic Communication:** 1992  
The National Telecommunications Commission Thailand. **National Table of Frequency Allocations:** December 2006  
Volume 1 HF Technology Edition 2. **Radio Communication in The Digital Age:** 1996  
The American Radio Relay League. **The ARRL Antenna Book:** June 1991